



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LILIANE KLEMMANN RAMINELLI

HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

CURITIBA

2019

LILIANE KLEMMANN RAMINELLI

HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

R173h

Raminelli, Liliane Klemann

Hierarquização de ações de eficiência hidroenergética em sistemas de abastecimento de água [recurso eletrônico] / Liliane Klemann Raminelli, 2019.

Tese (doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos

1. Abastecimento de água. 2. Recursos hídricos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos, Daniel Costa dos. III. Título.

CDD 621.252

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **LILIANE KLEMANN RAMINELLI**, intitulada: **HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de Doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 25 de Fevereiro de 2019.


DANIEL COSTA DOS SANTOS

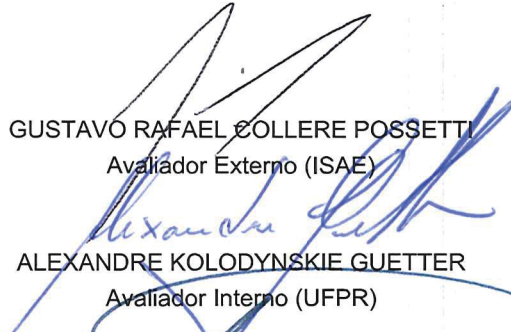
Presidente da Banca Examinadora


MARCELO RODRIGUES BESSA

Avaliador Interno (UFPR)


MARCELO GIULIAN MARQUES

Avaliador Externo (UFRGS)


GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI

Avaliador Externo (ISAE)


ALEXANDRE KOLODYNISKIE GUETTER

Avaliador Interno (UFPR)


SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA

Avaliador Interno (UFPR)

Prof. Sérgio Michelotto Braga
Mat. UFPR 200413

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA TESE PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL.

No dia vinte e cinco de fevereiro de dois mil e dezenove às 14:00 horas, na sala Sala Multimídia, Biblioteca do Setor de Tecnologia do Setor de SETOR DE TECNOLOGIA da Universidade Federal do Paraná, foram instalados os trabalhos de arguição da Doutoranda **LILIANE KLEMANN RAMINELLI** para a Defesa Pública de sua Tese de Doutorado intitulada: **HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: **DANIEL COSTA DOS SANTOS (UFPR)**, **GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI (ISAE)**, **MARCELO RODRIGUES BESSA (UFPR)**, **ALEXANDRE KOLODYNISKIE GUETTER (UFPR)**, **MARCELO GIULIAN MARQUES (UFRGS)**, **SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA (UFPR)**. Dando início à sessão, a presidência passou a palavra a(o) discente, para que a mesma expusesse seu trabalho aos presentes. Em seguida, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. A aluna respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais. A Banca Examinadora, então, e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela APROVAÇÃO da aluna. A Doutoranda foi convidada a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. A aprovação no rito de defesa deverá ser homologada pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais do programa. A outorga do título de Doutor está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, **DANIEL COSTA DOS SANTOS**, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

Observações: INFORMO QUE O TÍTULO CORRETO DA TESE É "HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA"

Curitiba, 25 de Fevereiro de 2019.

Daniel Costa dos Santos
DANIEL COSTA DOS SANTOS
Presidente da Banca Examinadora

Marcelo Rodrigues Bessa
MARCELO RODRIGUES BESSA
Avaliador Interno (UFPR)

Marcelo Giulian Marques
MARCELO GIULIAN MARQUES
Avaliador Externo (UFRGS)

Daniel Costa dos Santos
Prof. Daniel Costa dos Santos
Dep. de Hidráulica e Saneamento
Mat. UFPR 143596

Gustavo Rafael Collere Possetti
GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI
Avaliador Externo (ISAE)

Alexandre Kolodynskier Guetter
ALEXANDRE KOLODYNISKIE GUETTER
Avaliador Interno (UFPR)

Sérgio Michelotto Braga
SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA
Avaliador Interno (UFPR)

Prof. Sérgio Michelotto Braga
Prof. Sérgio Michelotto Braga
Mat. UFPR 200413

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais que me deram a vida e sempre em todos os momentos foram grandes incentivadores para que eu fosse cada vez mais longe em meus estudos. Mesmo quando eu achava que não conseguiria, eles estavam sempre ao meu lado me apoiando incondicionalmente.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos, por me orientar no decorrer desses quatro anos não somente como professor, mas também muitas vezes como psicólogo e ouvinte das lamentações da vida. Agradeço por todos os conselhos e conversas que tivemos e por ser um dos grandes responsáveis por eu ter chegado até aqui.

Aproveito para agradecer a vários professores do PPGERHA que me acompanharam ao longo desses anos, especialmente ao Prof. Dr. Cristóvão Scapulatempo Fernandes, que em um momento de incerteza da minha pesquisa, me deu uma ideia que fez toda a diferença para que o trabalho ficasse ainda mais completo.

Agradeço à Sanepar, em especial à Eng. Mariele Parra Agostinho, por ter fornecido todos os dados que eu precisava para a pesquisa e por toda a atenção que ela dedicou a mim quando precisei. Sem o auxílio dela essa pesquisa não teria dado certo.

Agradeço aos professores Gustavo Possetti, Alexandre Guetter, Marcelo Bessa e Marcelo Marques que participaram das várias bancas de qualificação e defesa final da minha tese e contribuíram muito para que o meu trabalho ficasse cada vez melhor.

Agradeço em especial ao meu marido que acompanhou de perto essa conquista, sofrendo junto e sempre tendo uma palavra de conforto nos momentos mais difíceis que passei.

Agradeço à toda minha família, em especial aos meus irmãos, que sempre estavam presentes nem que fosse para me ouvirem reclamar ou para me darem palavras de incentivo.

Agradeço a todos os colegas da UFPR com os quais tive a oportunidade de conviver e trocar experiências, um ajudando o outro.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que com certeza participaram de uma forma ou de outra dessa conquista.

RESUMO

O alto consumo de energia e os elevados índices de perdas de água em sistemas de abastecimento de água (SAA), principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, demonstram a falta de planejamento e gerenciamento que ocorre na maioria desses sistemas. Assim, é necessário que sejam tomadas ações a fim de melhorar a eficiência hidroenergética desses SAA. O principal desafio, porém, é definir quais ações trarão melhores resultados ao sistema. Essa dificuldade ocorre devido à complexidade dos SAA e à variedade de critérios que podem ser utilizados para a escolha das ações. Para que essa análise se torne mais completa devem ser considerados critérios diversos (técnicos, financeiros, sociais, ambientais). Além disso, há o interesse dos usuários do SAA, como a prestadora de serviços de saneamento, as comunidades, os órgãos públicos, entre outros, sendo necessário conciliar esses interesses. Para esse fim, já existem alguns programas de conservação de água e energia propostos, como o Programa de Conservação de Água para um Meio Urbano Sustentável (CAMUS), porém este não aborda a natureza multicriterial envolvida na questão. O objetivo desta tese é, portanto, propor um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), o Método da Análise Hierárquica (AHP), para integrar o programa CAMUS com o objetivo de inserir a complexidade advinda da abordagem multicriterial para a hierarquização de ações de conservação de água e energia em um SAA. Para isso, o Programa CAMUS foi adaptado ao AHP e para verificar a aplicabilidade da ferramenta, foi realizado um estudo de caso em parte do SAA de Curitiba, Paraná. No estudo de caso foram selecionadas três ações de eficiência hidroenergética, a saber, detecção e correção de vazamentos, uso racional da água e substituição das adutoras antigas por novas adutoras. Essas ações foram avaliadas por critérios financeiros (custo de implantação), ambientais (vazão captada e consumo de energia) e sociais (cobertura populacional). Para que fossem dados pesos a esses critérios foram entrevistados por meio de um questionário profissionais que trabalham na área de saneamento em empresas públicas e privadas usuárias do SAA em questão. O critério vazão captada foi o que recebeu maior peso, seguido dos critérios cobertura populacional, custo de implantação e consumo de energia. Após a execução do AHP e obtida a hierarquização das ações de eficiência hidroenergética, chegou-se à conclusão de que a detecção e correção de vazamentos seria a ação prioritária a ser executada, seguida do uso racional da água e, por último, da substituição das adutoras antigas por novas. Com o auxílio do estudo de caso, foi possível perceber que a proposição do AHP aplicado ao Programa Camus irá ajudar na tomada de decisão sobre a escolha das ações de eficiência hidroenergética, avaliando essas ações não somente pelos tradicionais critérios técnicos e financeiros, mas também por critérios de mais diversos tipos, como ambientais e sociais e, ainda, tendo em vista os diferentes interesses dos usuários do SAA. Existindo a possibilidade de ser elaborado um conjunto de diretrizes para o uso eficiente da água e energia no SAA analisado.

Palavras-chave: Eficiência hidroenergética. Hierarquização. Multicritérios. AHP. Sistemas de abastecimento de água.

ABSTRACT

The high energy consumption and water loss rates at water supply systems (WSS), mainly in developing countries, like Brazil, show the lack of planning and management that occurs in most of these systems. Therefore it's necessary that actions are taken to improve the hydraulic and energy efficiency of these WSS. The great challenge, however, is to define which actions will bring better results to the system. This difficulty occurs because of the complexity of WSS and because of the variety of criteria that could be used to choose the actions. In order that this analysis become more complete different criteria (technical, financial, social and environmental) must be considered. Besides that, there is the interest of the users of the WSS, like the sanitation services provider, the communities, public agencies, among others, and it's necessary to harmonize these interests. To this end, there are some water and energy conservation programmes proposed, like the Water Conservation for the Sustainable Environment Program (CAMUS), but this one does not address the multicriterial nature involved at the question. So the objective of this thesis is to propose a Decision Support Analysis, the Analytic Hierarchy Process (AHP), to integrate the CAMUS Program with the objective of insert the complexity of the multicriteria approach for the hierarchy of the hydraulic and energy efficiency actions at the WSS. For this the CAMUS Program was adapted to the AHP and to verify the applicability of the tool, a case study was carried out in part of the WSS of Curitiba, Parana. At the case study, three energy and hydraulic efficiency actions were selected, as the detection and correction of leaks, the rational use of water and the replacement of old water mains. These actions were evaluated through financial (implementation cost), environmental (flow rate and energy consumption) and social (population coverage) criteria. In order to define weights given to these criteria, professional that works in the sanitation area at public and private agencies users of the WSS were interviewed with a questionnaire. The criteria flow rate has received the highest weight, followed by coverage population, implementation cost, and energy consumption consumption. After the implementation of the AHP and the hierarchy of hydraulic and energy efficiency ations, it was concluded that the detection and correction of leaks would be the priorityc action to be carried out, followed by the rational use of water and, finally, the replacement of old water mains. With the case study, it was possible to note that the proposition of the AHP applied to CAMUS Program will help at the decision-making about the choice of the hydraulic and energy efficiency actions, evaluating these actions not only by the traditional technical and financial criteria, but also by criteria of the most diverse types, like environmental and social and also in view of the different interests of the user of the WSS. So there is the possibility of elaborating a set of guidelines for the efficient use of the water and energy in WSS analyzed.

Keywords: Hydraulic and energy efficiency. Hierarchy. Multicriteria. AHP. Water supply systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DAS VAZÕES DE RETIRADA PARA O ANO DE 2014	23
FIGURA 2 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA ANO BASE 2016	24
FIGURA 3 – ÍNDICE DE PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO DOS PRESTADORES DE SERVIÇO PARTICIPANTES DO SNIS EM 2016, SEGUNDO REGIÃO GEOGRÁFICA E MÉDIA NO BRASIL	26
FIGURA 4 – SAA COM CAPTAÇÃO EM CURSO DE ÁGUA E COM RESERVATÓRIO APOIADO	28
FIGURA 5 – SAA COM CAPTAÇÃO EM CURSO DE ÁGUA E COM RESERVATÓRIO ENTERRADO E ELEVADO	28
FIGURA 6 – SAA QUE ATENDE A ZONA BAIXA E A ZONA ALTA	29
FIGURA 7 – ESTRUTURA DO CAMUS	45
FIGURA 8 – ESTRUTURA HIERÁRQUICA GENÉRICA	50
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA ESTRUTURAÇÃO DA FERRAMENTA PARA HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SAAS	59
FIGURA 10 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA ABCD	66
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA NO DIA 13/12/2016.	80
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA NO EPANET	82
FIGURA 13 – CAIXA DE DIÁLOGO DO EPANET PARA A GERAÇÃO DA CURVA DAS BOMBAS 1, 2 E 3	85
FIGURA 14 – CAIXA DE DIÁLOGO DO EPANET PARA GERAÇÃO DA CURVA DAS BOMBAS 4 E 5	86
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA NO DIA DE MAIOR CONSUMO NO EPANET	87
FIGURA 16 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 1 NO SETOR A	92
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 1.1 E 1.2 NO SETOR A	93
FIGURA 18 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS A APLICAÇÃO DA AÇÃO 1 NO SETOR B	96

FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 1.3 E 1.4 NO SETOR B.....	97
FIGURA 20 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2 NO SETOR C	101
FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 2.1 E 2.2 NO SETOR B.....	102
FIGURA 22 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2 NO SETOR D	105
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICAS DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 2.3 E 2.4 NO SETOR D	106
FIGURA 24 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3 NO SETOR ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E RESERVATÓRIO B.....	109
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 3.1 E 3.2 NO SETOR ENTRE A ETA E RESERVATÓRIO A E O RESERVATÓRIO B	110
FIGURA 26 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3 NO SETOR PÓS CONJUNTO DE BOMBAS 2	113
FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 3.3 E 3.4 NO SETOR ENTRE O CONJUNTO DE BOMBAS 2 ATÉ OS SETORES C E D	114

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – AÇÕES DE ENGENHARIA PARA DIMINUIÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA.....	32
QUADRO 2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS AHP, ELECTRE E PROMETHEE	48
QUADRO 3 – ESCALA DE JULGAMENTOS DE IMPORTÂNCIA DO MÉTODO AHP	51
QUADRO 4 – RESUMO DAS AÇÕES SELECIONADAS, SUAS JUSTIFICATIVAS, OS SETORES EM QUE SERÃO APLICADAS E SEUS OBJETIVOS	78
QUADRO 5 – RESUMO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA SIMULADAS NO EPANET, OS SETORES DE APLICAÇÃO, OBJETIVOS E SETORES QUE SERÃO INFLUENCIADOS POR ESTAS	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RELAÇÃO ENTRE A ORDEM DA MATRIZ E O ÍNDICE RANDÔMICO	53
TABELA 2 – ESCALA DE JULGAMENTOS DE ACORDO COM A DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES SIMULADAS EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL	64
TABELA 3 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DETERMINADA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL.....	64
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELEVATÓRIO ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E SETOR A	67
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELEVATÓRIO ENTRE RESERVATÓRIO B E SETOR B	67
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DO <i>BOOSTER</i>	67
TABELA 7 – COTAS E VOLUMES DO RESERVATÓRIO DO SISTEMA.....	68
TABELA 8 – PANORAMA DO SISTEMA ABCD NO ANO DE 2016	68
TABELA 9 – SITUAÇÃO DOS SETORES DE DISTRIBUIÇÃO COMPONENTES DO SISTEMA ABCD NO ANO DE 2016	69
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DAS ADUTORA DO SISTEMA ABCD	70
TABELA 11 – QUANTIDADE DE ENTREVISTADOS EM CADA GRUPO DE <i>STAKEHOLDERS</i>	71
TABELA 12 – MATRIZES 1 E 2 DE JULGAMENTOS MONTADAS A PARTIR DOS QUESTIONÁRIOS RESPONDIDOS PELOS DOIS ENTREVISTADOS QUE TRABALHAM NA SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE MUNICIPAL.....	72
TABELA 13 – MATRIZ GLOBAL DE JULGAMENTO DA SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE MUNICIPAL APÓS A REALIZAÇÃO DA MÉDIA GEOMÉTRICA DAS CÉLULAS DAS MATRIZES APRESENTADAS NA TABELA 10	73
TABELA 14 - VETOR PRIORIDADE DA SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE MUNICIPAL OBTIDO APÓS A EXECUÇÃO DO AHP	73

TABELA 15 – RESULTADOS DOS VETORES PRIORIDADE DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS PARA CADA UM DOS <i>STAKEHOLDERS</i> ENTREVISTADOS.....	74
TABELA 16 – HIERARQUIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS AVALIADOS PELO GRUPO DE <i>STAKEHOLDERS</i>	76
TABELA 17 – PANORAMA DO SISTEMA NO DIA 13/12/2016	80
TABELA 18 – DADOS DE ENTRADA DA ETA IRAÍ E DOS TRÊS RESERVATÓRIOS NO EPANET.....	83
TABELA 19 – DADOS DE ENTRADA DOS NÓS REPRESENTADOS NO EPANET	83
TABELA 20 – DADOS DE ENTRADAS DOS TRECHOS REPRESENTADOS NO EPANET	84
TABELA 21 – DADOS DE ENTRADA DO <i>BOOSTER</i> NO EPANET	84
TABELA 22 – DADOS DAS VAZÕES REAIS E SIMULADAS DAS HORAS ESCOLHIDAS ALEATORIAMENTE DENTRO DO DIA DE MAIOR CONSUMO E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (R).....	88
TABELA 23 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.1 NO SETOR A	94
TABELA 24 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.2 NO SETOR A	95
TABELA 25 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS A APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.3 NO SETOR B	98
TABELA 26 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS A APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.4 NO SETOR B	99
TABELA 27 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.1 NO SETOR C	103
TABELA 28 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.2 NO SETOR C	103
TABELA 29 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS A APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.3 NO SETOR D	107
TABELA 30 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.4 NO SETOR D	107

TABELA 31 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.1 NO SETOR ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E RESERVATÓRIO B	111
TABELA 32 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.2 NO SETOR ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E RESERVATÓRIO B	112
TABELA 33 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.3 NO SETOR PÓS CONJUNTO DE BOMBAS 2.....	115
TABELA 34 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.4 NO SETOR PÓS CONJUNTO DE BOMBAS 2.....	116
TABELA 35 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIA DIRETA NO SETOR A	117
TABELA 36 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIA DIRETA NO SETOR B	118
TABELA 37 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIAS DIRETAS NO SETOR C	119
TABELA 38 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIAS DIRETAS NO SETOR D	119
TABELA 39 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE AS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL.....	121
TABELA 40 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL	121
TABELA 41 - FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE AS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA.....	122
TABELA 42 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA.....	122

TABELA 43 - FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA.....	123
TABELA 44 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA	123
TABELA 45 - FAIXAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO ENTRE AS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS COM CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	124
TABELA 46 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	124
TABELA 47 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR A.....	125
TABELA 48 - FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES COM OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL.....	126
TABELA 49 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL	126
TABELA 50 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA	127
TABELA 51 – MATRIZ DE JULGAMENTO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO BOMBEADA ...	128
TABELA 52 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA.....	128

TABELA 53 – MATRIZ DE JULGAMENTOS PAR A PAR DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA.....	129
TABELA 54 – FAIXAS DE DIFERENÇAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO ENTRE AS AÇÕES COM OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	129
TABELA 55 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	130
TABELA 56 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR B.....	130
TABELA 57 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS PARA CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL.....	132
TABELA 58 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL	132
TABELA 59 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA	133
TABELA 60 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO BOMBEADA ...	133
TABELA 61 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA	134
TABELA 62 – MATRIZ DE JULGAMENTO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA	134
TABELA 63 – FAIXAS DE DIFERENÇAS DOS CUSTOS DE IMPLATAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS	

ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	135
TABELA 64 – MATRIZ DE JULGAMENTO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	135
TABELA 65 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR C	136
TABELA 66 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL.....	137
TABELA 67 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL	137
TABELA 68 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA	138
TABELA 69 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA.....	138
TABELA 70 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA	139
TABELA 71 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA	139
TABELA 72 – FAIXAS DE DIFERENÇAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	140

TABELA 73 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	140
TABELA 74 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR D	140
TABELA 75 – SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS FINAIS DO AHP POR SETOR DO SISTEMA.....	141

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 DELIMITAÇÃO E FORMATAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2 HIPÓTESES	18
1.3 JUSTIFICATIVAS	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1 ÁGUA E ENERGIA.....	21
3.1.1 Panorama hídrico nacional.....	22
3.1.2 Panorama energético nacional	23
3.1.3 Água e energia nos sistemas de abastecimento de água	25
3.2 SANEAMENTO AMBIENTAL	27
3.2.1 Sistemas de Abastecimento de Água (SAA)	27
3.3 EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SAA	31
3.3.1 Ações de eficiência hidroenergética nos SAA	32
3.3.1.1 Controle e detecção de vazamentos	33
3.3.1.2 Controle de pressão	36
3.3.1.3 Uso de equipamentos eficientes.....	37
3.3.1.4 Gestão da demanda	38
3.3.2 Indicadores de sustentabilidade relacionados aos SAA.....	41
3.3.2.1 Indicadores de eficiência hidroenergética.....	41
3.3.2.2 Indicadores sociais	43
3.3.2.3 Indicadores ambientais.....	43
3.3.2.4 Indicadores financeiros	43
3.4 PROGRAMAS DE CONSERVAÇÃO DA ÁGUA EM MEIO URBANO	44
3.4.1 Programa de Conservação da Água para um Meio Urbano Sustentável – CAMUS	44
3.5 SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO (SAD).....	47
3.5.1 Método da Análise Hierárquica (<i>Analytic Hierarchy Process</i> – AHP)	49
3.5.1.1 Análise de Consistência do Método AHP	53

3.5.1.2 Trabalhos acadêmicos utilizando o AHP na área de abastecimento de água.....	54
4 MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1 ESTRUTURAÇÃO DA FERRAMENTA PARA HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SAA	59
4.1.1 Escolha do Sistema.....	60
4.1.2 Apresentação do Sistema	60
4.1.3 Definição dos Critérios e Pesos da Avaliação	60
4.1.4 Seleção das Ações de Eficiência Hidroenergética Aplicáveis	61
4.1.5 Concepção e Avaliação das Ações de Eficiência Hidroenergética Aplicáveis ..	62
4.1.6 Hierarquização das Ações de Eficiência Hidroenergética Aplicáveis pelo AHP.....	63
5 ESTUDO DE CASO	65
5.1 ESCOLHA DO SISTEMA	65
5.2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA.....	65
5.3 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E PESOS DE AVALIAÇÃO.....	70
5.4 SELEÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA.....	77
5.5 CONCEPÇÃO E AVALIAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA APLICÁVEIS.....	79
5.5.1 Descrição da situação real operacional.....	79
5.5.2 Representação das condições de operação do dia de maior consumo no Epanet.....	81
5.5.3 Validação do modelo	88
5.5.4 Simulações das ações de eficiência hidroenergética no Epanet.....	89
5.5.5 Sumarização das ações de eficiência hidroenergética.....	116
5.5.5.1 Setor A.....	116
5.5.5.2 Setor B.....	117
5.5.5.3 Setor C	118
5.5.5.4 Setor D	119
5.6 HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PELO AHP.....	120
5.6.1 Setor A	120
5.6.2 Setor B	125
5.6.3 Setor C	131

5.6.4 Setor D	136
5.6.5 Sumarização dos resultados finais do AHP	141
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
REFERÊNCIAS.....	146
APÊNDICE 1 – QUESTIONÁRIO UTILIZADO PARA ENTREVISTAR OS STAKEHOLDERS.....	151

1 INTRODUÇÃO

1.1 DELIMITAÇÃO E FORMATAÇÃO DO PROBLEMA

Água e energia são elementos essenciais à vida, além de estarem intimamente conectados. No setor de saneamento não é diferente, é estimado que aproximadamente 2 a 3% de toda eletricidade consumida no mundo é usada em Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) (ALLIANCE TO SAVE ENERGY, 2002). No Brasil a situação se repete, em torno de 3% da energia é consumida pelos SAA (BRASIL, 2016).

Além desse consumo de energia, boa parte da água que deveria ser entregue ao consumidor final é perdida, principalmente, na rede de distribuição. Atualmente, o Brasil tem um índice médio de perdas de água de 38,1% (BRASIL, 2018).

Todos esses dados demonstram a necessidade de melhorar a eficiência hidroenergética dos SAA para que não haja um colapso no sistema.

Na literatura são encontradas muitas ações que podem ser executadas nos SAA para a conservação da água e energia desses. Porém, apesar do grande leque de opções existentes, o principal desafio é definir qual seria a ordem de prioridade dessas ações ou, ainda, qual ação deveria ser executada primeiro a fim de obter um melhor resultado em um período de tempo menor. Essa dificuldade ocorre devido à complexidade dos SAA e também devido à grande variedade de critérios que podem ser utilizados para definir a ordem de prioridade das ações. Para uma análise mais completa devem ser utilizados critérios financeiros, sociais e ambientais em conjunto permitindo, assim, uma análise sistêmica das ações a serem tomadas. Além disso, há o interesse de diversos usuários nos SAA, como a prestadora de serviços de saneamento, as comunidades que recebem essa água, os órgãos ambientais, os agentes públicos, entre outros, e é necessário tentar conciliar os interesses de cada um desses atores.

É nesse contexto, então, que surge a oportunidade desse trabalho, visando responder a seguinte pergunta da pesquisa:

Como promover o uso eficiente da água no meio urbano, especialmente em SAA, dada a complexidade gerada pelos interesses de diversos usuários, dentre os

quais as comunidades, prestadoras de serviços de saneamento, órgãos ambientais, agentes públicos, etc.?

1.2 HIPÓTESES

A fim de responder à pergunta da pesquisa, formularam-se três hipóteses:

- a. A abordagem multicriterial e complexa que considera aspectos sociais, ambientais e financeiros possibilita encaminhar soluções de conservação e racionalização de água e energia que promovam o uso eficiente desses insumos;
- b. A consideração das abordagens social, ambiental e financeira conduzem a uma hierarquização de ações para o uso eficiente da água e energia que difere daquela hierarquização quando se considera apenas os aspectos financeiros;
- c. Pela abordagem integrada entre os SAA e as edificações é possível elaborar ações de conservação e racionalização de água e energia sob a complexidade de seus usos nas áreas urbanas.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A principal justificativa desse trabalho é o fato de o Brasil estar passando por problemas de falta de água e também de crise energética e ao mesmo tempo possuir vários SAA consumindo muita energia e desperdiçando água. Assim, é necessário a implantação de ações de conservação e racionalização de água e energia nesses sistemas urgentemente.

Além disso, a escolha de quais ações devem ser implementadas em um SAA não é uma tarefa simples. Na maior parte dos casos leva-se em consideração apenas os critérios financeiros e pensa-se somente no interesse da prestadora de serviços de saneamento. Mas, a complexidade do SAA e seus diversos usuários exigem que esse processo de escolha seja feito a partir de uma abordagem multicriterial, considerando-se critérios financeiros, ambientais e sociais e os interesses dos diversos usuários. Portanto, mais uma justificativa do trabalho, é a escassez de trabalhos com

abordagens multicriteriais que considerem todos aqueles critérios para a promoção da eficiência hidroenergética em SAAs nas cidades brasileiras.

Como consequência, existe uma grande incerteza sobre quais são as ações que trarão melhores resultados em relação à conservação e racionalização de água e energia destes.

Nesse contexto, no intuito de contribuir para a concepção de estratégias e para o respectivo projeto de intervenção de conservação de água e energia na infraestrutura sanitária, foi proposto o Programa de Conservação de Água para um Meio Urbano Sustentável (CAMUS) (SANTOS, 2016). Este tem por etapas a caracterização do cenário de interesse, a caracterização das ações de conservação da água, a avaliação da aplicabilidade, a hierarquização e o planejamento e gestão. A etapa de hierarquização é operada pelo modelo matemático UWU (*Urban Water Use*), o qual é estruturado sob os princípios de planejamento estratégico e do enfoque sistêmico. Dessa forma, critérios de sustentabilidade e cenários de projeção futura são trabalhados, todavia sem a acurácia própria dos Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) de natureza multicriterial. Tem-se, assim, uma restrição metodológica nas aplicações do UWU que impulsiona à busca de soluções mais robustas para lidar com a complexidade própria da realidade social, ambiental e financeira. Assim, é essa busca que interessa a esse trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) específico para integrar o Programa CAMUS, no intuito de capacitá-lo a lidar com a complexidade que emerge da necessária abordagem multicriterial para a hierarquização de ações de conservação de água e energia em um SAA.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir os critérios de eficiência hidroenergética que sejam mais relevantes para a obtenção da hierarquização das ações;
- Definir as principais ações de eficiência hidroenergética em SAA;
- Desenvolver o SAD baseado no AHP (*Analytic Hierarchy Process*);
- Adaptar o CAMUS ao SAD proposto;
- Realizar um estudo de caso aplicando a ferramenta já estruturada;
- Elaborar, em caráter propositivo, um conjunto de diretrizes para o uso eficiente da água e energia no sistema analisado no estudo de caso.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ÁGUA E ENERGIA

Água e energia estão intimamente interligadas e são altamente interdependentes. O setor de água é um grande consumidor de energia, pois a utiliza no tratamento, bombeamento e dessalinização (LARSEN; DREWS, 2019). Similarmente, a água é essencial para o resfriamento de usinas que produzem energia, geração de eletricidade e produção de biocombustíveis (LARSEN; DREWS, 2019). Escolhas feitas e ações tomadas em um domínio podem afetar fortemente o outro, positiva ou negativamente (WWAP, 2014). Além disso, possuem impactos cruciais em relação à redução da pobreza. Esses impactos podem ser diretos, dependendo de melhoria no acesso à água, saneamento e fontes de energia e, indiretos, devido a restrições de água e energia que podem afetar o crescimento econômico de um país (WWAP, 2014). A falta de entendimento da interdependência existente entre água e energia dentro de um sistema pode levar a um uso excessivo ou a uma má administração dos recursos (RINGLER; BHADURI; LAWFORD, 2013).

Ainda, água e energia são críticas ao bem estar do ser humano e também a um desenvolvimento sustentável. Dois terços da população mundial, hoje, vive em áreas em que há escassez hídrica ao menos um mês ao ano (WWAP, 2018). É estimado que nos países em desenvolvimento, em 2050, a parcela da população urbana será maior que 50% (WWAP, 2014). Esse rápido crescimento da população, principalmente da população urbana, em conjunto com o desenvolvimento econômico global irá adicionar uma grande pressão sobre os recursos em nosso planeta, incluindo água, energia, alimento, terra e ecossistemas (DAI et al., 2018). A demanda global de água está projetada para crescer em torno de 55% até 2050 devido principalmente à crescente demanda na manufatura (400%), geração de eletricidade térmica (140%) e uso doméstico (130%) (WWAP, 2014). Como resultado, a disponibilidade de água sofrerá uma crescente restrição e mais de 40% da população global está projetada para viver em áreas com uma severa restrição de água até 2050 (WWAP, 2014). Já em relação a demanda primária de energia anual, em 2035, esta irá aumentar para 40% quando comparada com a de 2010 (IEA, 2012).

Em frente a esse panorama, economizar água e energia torna-se essencial ao desenvolvimento sustentável por todo o mundo. A economia de energia pode

diminuir a pressão sobre os recursos hídricos, assim como a água requerida para produzir energia pode ser também economizada e realocada. Além disso, o aumento da eficiência hídrica contribui igualmente para a redução da quantidade de energia consumida para transportar, aquecer e tratar água (DAI et al., 2018).

No Brasil a situação não é diferente do panorama mundial, e a dependência das fontes hídricas é ainda maior, pois mais de 63% da energia elétrica produzida é proveniente de fonte hidráulica (EPE, 2015), como pode ser visto nos panoramas hídrico e energético nacional apresentados a seguir.

3.1.1 Panorama hídrico nacional

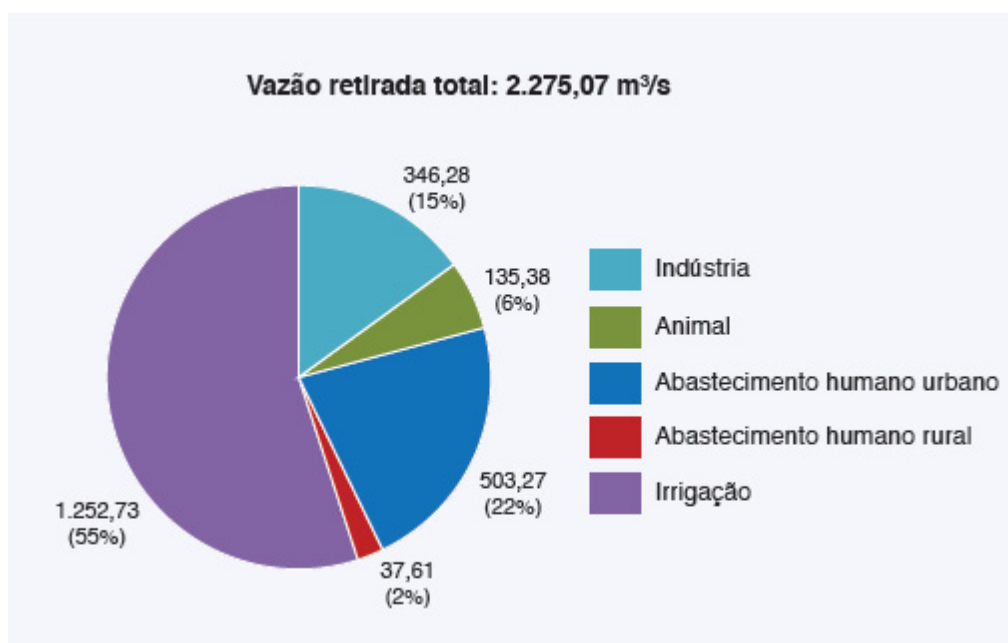
Em termos globais, o Brasil possui grande oferta de água, observando-se que passam no território brasileiro em média cerca de 260.000 m³/s (ANA, 2015). Apesar da abundância, cerca de 80% desse total encontra-se na região Amazônica, onde vive a menor parte da população e a demanda de água é menor (ANA, 2017).

Além dessas questões espaciais, o regime fluvial sofre variações ao longo do ano, que estão estreitamente relacionadas ao regime de precipitações. Na maior parte do Brasil, existe uma sazonalidade bem marcada, com estações secas e chuvosas bem definidas. Assim, para manter uma maior garantia de água ao longo do tempo, é necessária a utilização de reservatórios ou açudes, capazes de reservar água nos períodos úmidos para ofertar nos períodos mais secos (ANA, 2015).

Estima-se que a disponibilidade hídrica superficial no Brasil seja em torno de 78.600 m³/s ou 30% da vazão média, sendo que 65.617 m³/s correspondem à contribuição da bacia amazônica (ANA, 2017).

Já a demanda por uso de água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado nas últimas duas décadas. A previsão é de que, até 2030, a retirada aumente 30% (ANA, 2017). Atualmente a demanda consuntiva total estimada para o Brasil foi de 2.275,07 m³/s, quando considerada vazão retirada (ANA, 2015). O setor de irrigação foi responsável pela maior parcela retirada (55% do total), seguido das vazões de retirada para fins de abastecimento humano (22%), industrial (15%), animal (6%) e abastecimento humano rural (2%) como apresentado na FIGURA 1, a seguir. A vazão efetivamente consumida foi de 1.209,64 m³/s (ANA, 2015).

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DAS VAZÕES DE RETIRADA PARA O ANO DE 2014



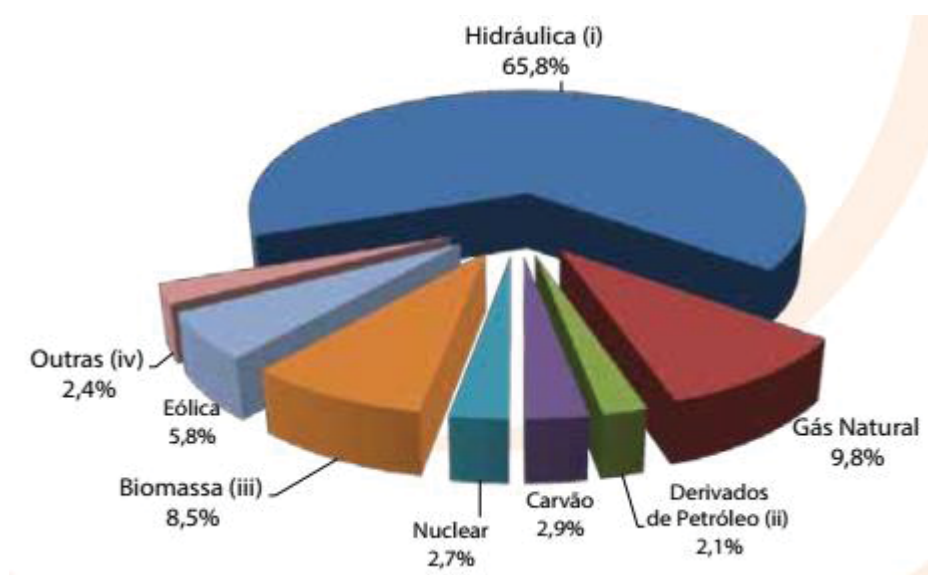
FONTE: ANA, 2015.

Apesar do setor de irrigação ser o maior consumidor de água no país, observa-se que o consumo para abastecimento humano urbano é também bastante significativo, com uma vazão de retirada de aproximadamente 503,27 m³/s de acordo com os dados da FIGURA 1. Ainda, de acordo com informações do Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2016 (BRASIL, 2018), 93% da população urbana brasileira recebem os serviços de abastecimento de água. Significando, com isso, que se o serviço de abastecimento de água chegar a atender 100% da população urbana, seria acrescido 6,8% aos 22% já consumidos para abastecimento humano urbano (BRASIL, 2016). Tornando ainda mais significativo esse consumo em relação ao total.

3.1.2 Panorama energético nacional

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que corresponde por 65,8% da oferta interna, como se observa na FIGURA 2, conforme segue. As fontes renováveis representam 80,5% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2017).

FIGURA 2 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA ANO BASE 2016



FONTE: EPE, 2017.

Em 2016, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou 150.338 MW, com um acréscimo de 9.480 MW em relação ao ano anterior (EPE, 2017). Na composição da capacidade instalada, as usinas hidrelétricas contribuíram com 60,9%, as usinas termelétricas com 27,5%, as usinas eólicas com 6,7%, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) com 3,3%, as usinas nucleares com 1,3% e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) com 0,3% (EPE, 2017).

Com relação ao consumo, o setor industrial é o maior consumidor de eletricidade (35,7%), seguido do residencial (28,8%), comercial (19,1%), rural (5,9%), poder público (3,3%) iluminação pública (3,3%), serviço público (3,2%), e consumo próprio (0,7%) (EPE, 2017).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) divulgou em 2016 um estudo com a projeção do consumo de eletricidade brasileiro até 2050, a pesquisa aponta que irá haver um acréscimo no consumo de eletricidade pelo setor comercial, estimado em 36%; em contrapartida ocorrerão reduções nos consumos dos setores industrial (27,6%) e residencial (22%); os outros setores corresponderão à 14,3% do total consumido de eletricidade (EPE, 2016). Todas essas mudanças apontadas se devem à situação econômica que o país se encontrará nesse período (EPE, 2016).

3.1.3 Água e energia nos sistemas de abastecimento de água

Como visto no tópico anterior, o uso da água para produção de eletricidade no Brasil é evidente, mas pouco é conhecido sobre o cenário oposto, o uso de eletricidade no fornecimento e distribuição de água (VILANOVA; BALESTIERI, 2015).

No Brasil, em 2016, foram consumidos aproximadamente 460.829 GWh, destes 3,2% (aproximadamente 14.969 GWh) referem-se ao setor de Serviço Público (EPE, 2016). De acordo com classificação realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), esse setor é caracterizado pelo fornecimento exclusivo de energia para motores, máquinas e serviços públicos de água, esgoto, saneamento e tração elétrica urbana ou ferroviária, explorados diretamente pelo Poder Público ou mediante concessão ou autorização. Ainda, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) foram consumidos aproximadamente 10.600 GWh pelos sistemas de água (BRASIL, 2018).

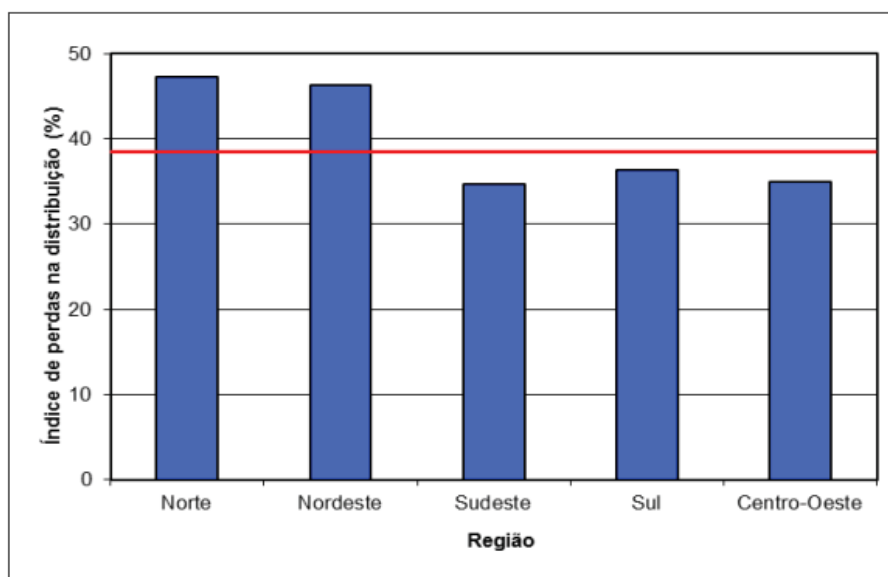
O consumo de energia elétrica está presente em todos os componentes dos SAA, seja para iluminação das instalações, serviços em escritório, equipamentos de monitoramento e controle, acionamento de motores elétricos, dentre outros. Entretanto, os componentes responsáveis pela maior parcela de consumo de energia (cerca de 90 a 95% do consumo total de energia) são as estações de bombeamento de água bruta e tratada (ABES, 2009). Deve-se ressaltar, ainda, que o consumo de energia pelos sistemas de bombeamento dependerá fortemente de fatores físicos do local em que está inserido, tais como a extensão da rede e a topografia da área de abrangência. Essas características determinarão as distâncias percorridas pelas adutoras e a altura de recalque necessária (ABES, 2009).

O consumo de energia possui uma relação direta com as perdas de água existentes nos SAA, pois é necessário, em média, 0,69 kWh para produzir 1 m³ de água potável (VILANOVA; BALESTIERI, 2014). Assim, uma redução no índice de perdas e o uso racional da água terão influência significativa no custo de energia elétrica, visto que a diminuição do volume de água recalçada leva a uma diminuição no consumo de energia elétrica (ABES, 2009).

Como citado anteriormente, a perda de água que ocorre nos SAA é um fator muito importante no contexto de água e energia nos SAA. Essas perdas se agravam em situações de escassez hídrica e com os custos de energia elétrica, além da relação direta com a saúde financeira dos prestadores de serviços. É sabido que os SAA

sempre apresentarão perdas, porém quando essas perdas são consideradas muito elevadas representam desperdício de recursos naturais, operacionais e de receita para o prestador de serviços (BRASIL, 2016). Países como Alemanha e Japão, conseguiram reduzir suas perdas para aproximadamente 10%, enquanto Austrália e Nova Zelândia romperam o patamar inferior a 10% (BRASIL, 2018). A média do Brasil tem diminuído ao longo dos anos e situa-se, atualmente, no patamar dos 38,1% (BRASIL, 2018). Quase a totalidade das perdas em um SAA acontece na distribuição, principalmente nos ramais (BRASIL, 2016). A FIGURA 3, a seguir, apresenta o índice de perdas de água que ocorrem na distribuição dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2016, segundo região geográfica e média do Brasil.

FIGURA 3 – ÍNDICE DE PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO DOS PRESTADORES DE SERVIÇO PARTICIPANTES DO SNIS EM 2016, SEGUNDO REGIÃO GEOGRÁFICA E MÉDIA NO BRASIL



FONTE: BRASIL, 2018.

A FIGURA 3 mostra o índice médio de perdas de água na distribuição no Brasil em 2016 (linha vermelha), que é aproximadamente 38,1% e os índices de perdas de água nas diferentes regiões do país. Observa-se que as regiões Norte e Nordeste são as que possuem piores índices, ambas em torno de 47%, já as regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste são as que apresentam melhores índices, 35%, 36,3% e 34,7%, respectivamente (BRASIL, 2018). Todos esses dados demonstram a importância da realização de um gerenciamento dessas perdas de água e, posteriormente, de um

plano de ações que possibilite a redução destas e também do gasto energético dos sistemas.

3.2 SANEAMENTO AMBIENTAL

O saneamento ambiental envolve o conjunto de ações técnicas e sócio-econômicas, entendidas fundamentalmente como de saúde pública, tendo por objetivo alcançar níveis crescentes de salubridade ambiental, compreendendo o abastecimento de água em quantidade e dentro dos padrões de potabilidade vigentes, o manejo de esgotos sanitários, de águas pluviais, de resíduos sólidos e emissões atmosféricas, o controle ambiental de vetores e reservatórios de doenças, a promoção sanitária e o controle ambiental do uso e ocupação do solo e prevenção e controle de excesso de ruídos, tendo como finalidade promover e melhorar as condições de vida urbana e rural (BRASIL, 2005).

Nesse trabalho serão focados os sistemas de abastecimento de água (SAA).

3.2.1 Sistemas de Abastecimento de Água (SAA)

De acordo com o Manual de Saneamento elaborado pela FUNASA, um Sistema de Abastecimento Público de Água constitui-se de um conjunto de obras, instalações e serviços, destinados a produzir e distribuir água a uma comunidade, em quantidade e qualidade compatíveis com as necessidades da população, para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos (BRASIL, 2006).

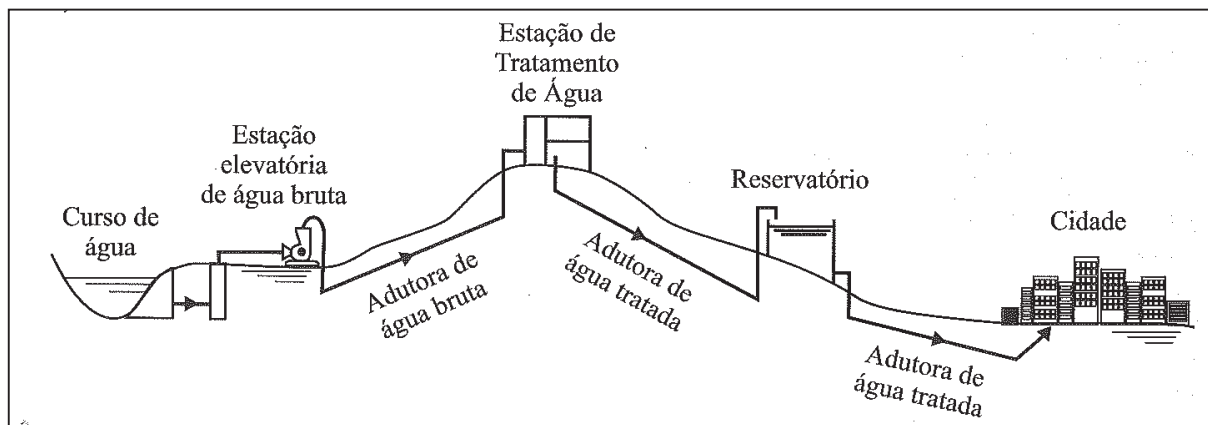
Assim, o objetivo principal do SAA é fornecer ao usuário uma água de boa qualidade para seu uso, quantidade adequada e pressão suficiente (TSUTIYA, 2006).

Os sistemas convencionais de abastecimento de água são compostos por: manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água (ETA), reservatório e rede de distribuição. De um modo geral, as concepções de sistemas de abastecimento dependem principalmente do tipo de manancial, da topografia da área e da população a ser atendida (TSUTIYA, 2006).

As concepções variam com a captação que pode ser em manancial superficial ou subterrâneo. Em manancial superficial podem ocorrer captações em cursos de

água, em represas ou em manancial de serra. São apresentadas a seguir algumas configurações possíveis quanto à captação em curso d'água.

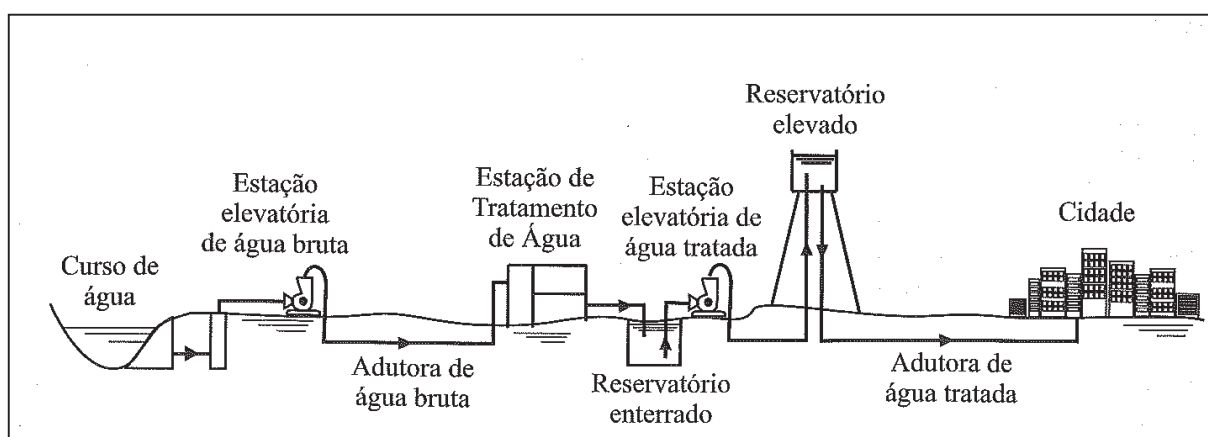
FIGURA 4 – SAA COM CAPTAÇÃO EM CURSO DE ÁGUA E COM RESERVATÓRIO APOIADO



FONTE: TSUTIYA, 2006.

A FIGURA 4 apresenta uma configuração de SAA em que o curso d'água se encontra em uma cota inferior à da ETA, sendo necessária uma estação elevatória para que a água chegue até esta. Depois de ser tratada na ETA, a água segue por gravidade até um reservatório apoiado e depois é distribuída para a cidade.

FIGURA 5 – SAA COM CAPTAÇÃO EM CURSO DE ÁGUA E COM RESERVATÓRIO ENTERRADO E ELEVADO

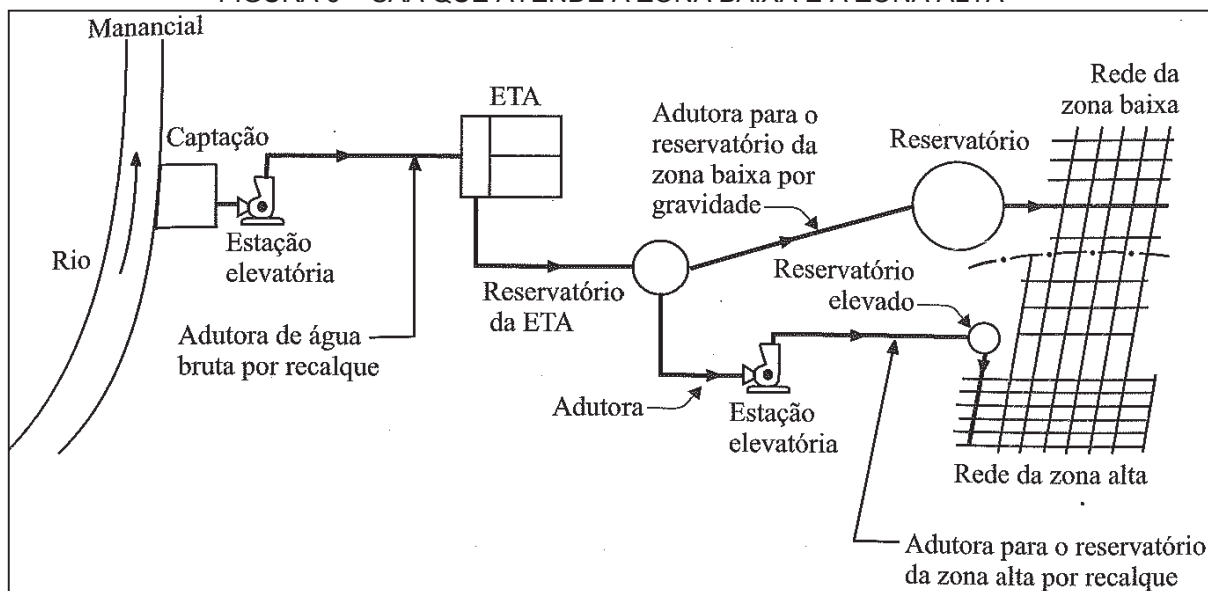


FONTE: TSUTIYA, 2006.

Na FIGURA 5 o SAA é composto por dois reservatórios diferentes, um deles enterrado e outro elevado. Além disso, a água chega à ETA por uma estação

elevatória, pois esta se encontra em uma cota superior à do curso d'água e, depois para que a água chegue até o reservatório elevado é utilizada novamente uma estação elevatória. Já a distribuição para a cidade ocorre por gravidade.

FIGURA 6 – SAA QUE ATENDE A ZONA BAIXA E A ZONA ALTA



FONTE: TSUTIYA, 2006.

Na FIGURA 6 é apresentado um SAA composto por uma rede de distribuição localizada em uma zona baixa que é atendido por um reservatório apoiado e por uma zona de distribuição localizada e uma zona alta que é atendido por um reservatório elevado. Entre a captação e a ETA também existe uma estação elevatória para que a água possa chegar até esta.

Em relação ao consumo de energia, as estações elevatórias de água bruta e de água tratada são as maiores consumidoras devido aos seus portes serem maiores, pois bombeiam um volume maior de água. Em seguida estão os *boosters*, que também podem ter um porte significativo e fazem a elevação e pressurização constante de redes de abastecimento de água. E, por fim, estão as pequenas bombas de aplicações diversas, como dosagem do tratamento químico (ABES, 2009).

Um dos métodos mais utilizados nos sistemas de bombeamento convencionais é o controle de vazão por meio de válvulas tipo globo, gaveta ou borboleta, sendo manobradas de acordo com as necessidades operacionais de demanda (RODRIGUES, 2007). Esse controle é realizado através da introdução de perdas de carga.

Outro método bastante comum em instalações de bombeamento é o uso de um “*by-pass*” na saída do recalque, cuja função é o retorno de uma parcela de vazão recalçada à caixa ou reservatório de sucção fazendo com isso a dosagem da vazão aos níveis desejados (RODRIGUES, 2007).

O uso desses métodos penalizam o sistema, principalmente o primeiro deles, pois trata-se de uma situação em que a pressão é significativamente maior do que a requerida pelo sistema, sendo necessário que as válvulas sejam operadas em condições de estrangulamento. Assim, a operação dessa maneira pode ser comparada à de dirigir um carro com o freio de mão puxado, o resultado é o desperdício desnecessário de energia (WOOD; REDDY, 1994).

A solução mais comumente encontrada para que não ocorra o desperdício desnecessário de energia citado, tem sido o uso do inversor de frequência através de bombas de rotação variável, proporcionando uma melhoria significativa na eficiência dos SAA, acompanhado por uma economia de energia e custo (WOOD; REDDY, 1994). Com o uso dessas bombas é possível controlar precisa e eficientemente a operação dos sistemas. As bombas de rotação variável possuem um motor acoplado a uma unidade de velocidade variável, assim, o motor pode girar em diferentes velocidades, resultando em mudanças na curva característica da bomba (SIMPSON; MARCHI, 2013). Além dos benefícios econômicos, existem muitas outras vantagens no uso de bombas de rotação variável, como: as pressões podem ser mantidas muito próximas dos níveis requeridos; as perdas de água causadas por vazamentos, as quais são relacionadas diretamente às pressões, são minimizadas devido às pressões mínimas poderem ser mantidas; os tempos de operação das bombas podem ser mais facilmente controlados, e estas podem ser mais utilizadas fora dos horários de pico resultando em economias de custo e em um uso mais eficiente da energia; entre outros (WOOD; REDDY, 1994).

Já os *boosters*, são geralmente utilizados em instalações que necessitam de aumento de pressão ou de vazão, podendo ser utilizados na adução e na distribuição de água (TSUTIYA, 2006). Os *boosters* são instalações de bombeamento em que não há poço de sucção a montante da bomba, desta forma, a pressão na sucção é a pressão do sistema a montante da bomba (ELETROBRÁS, 2005). O *booster* utilizado na adução é conhecido como *booster* de linha, pois o conjunto motobomba fica intercalado na tubulação de modo que recebe água do lado montante com uma determinada pressão e injeta-a no lado de jusante com uma pressão mais elevada

(TSUTIYA, 2006). Já na distribuição de água, o *booster* novamente é instalado na tubulação, com o objetivo de aumentar a pressão à jusante, auxiliando o escoamento e procurando manter a pressão constante em toda a rede de distribuição de água, independente das variações de consumo ocorridas ao longo do dia (TSUTIYA, 2006). Para isso normalmente se utiliza nos conjuntos motobomba os variadores de rotação de bomba (variador hidrocínético ou inversor de frequência) (TSUTIYA, 2006).

3.3 EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SAA

O termo eficiência hidroenergética trata-se da junção da eficiência energética e da eficiência hidráulica. A eficiência hidráulica consiste na redução de perdas reais (ou físicas) e aparentes de água durante a distribuição. As perdas reais correspondem à parcela de água correspondente ao volume perdido durante a lavagem de filtros na ETA, nos reservatórios devido a vazamentos e extravasamentos e ao longo da distribuição novamente devido a vazamentos (ABES, 2009). Já as perdas aparentes, correspondem ao volume de água consumido, porém não contabilizado pelo prestador de serviço de saneamento, decorrente de erros de medição nos hidrômetros e demais tipos de medidores, fraudes, ligações clandestinas e falhas no cadastro comercial (ABES, 2009). Já, a eficiência energética busca promover a redução do consumo e dos custos de energia elétrica.

No Brasil, em 2003, a ELETROBRÁS/PROCEL instituiu o PROCEL SANEAR – Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental, que atua de forma conjunta com o Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água – PNCDa e o Programa de Modernização do Setor de Saneamento – PMSS, ambos coordenados pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA, vinculada ao Ministério das Cidades.

O PROCEL SANEAR tem como principais objetivos: promover ações que visem o uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental, incluindo os consumidores finais, incentivar o uso eficiente dos recursos hídricos, como estratégia de prevenção à escassez de água destinada à geração hidroelétrica e, por último, contribuir para a universalização dos serviços de saneamento ambiental, com menores custos para a sociedade (ELETROBRÁS, 2006).

Esse combate à diminuição do excesso de consumo de energia, provocado pela ineficiência energética, sem que haja comprometimento de qualidade do serviço de abastecimento, depende de um conjunto de ações nas áreas das engenharias hidráulica, mecânica e elétrica (GOMES, 2009).

Na literatura aparecem algumas ações gerais a serem tomadas nos SAA que visam a eficiência hidroenergética desses sistemas. A seguir essas ações são descritas.

3.3.1 Ações de eficiência hidroenergética nos SAA

De forma genérica, os desperdícios de energia elétrica nos SAA, são decorrentes de fatores como: formas contratuais indevidas, procedimentos operacionais inadequados, desperdícios de água, mau dimensionamento dos sistemas, idade avançada dos equipamentos, tecnologias mal utilizadas, erros de concepção dos projetos e manutenções precária (GOMES, 2005). As medidas de eficiência energética em sistemas de saneamento podem ser divididas em ações administrativas e operacionais, sendo que nesse trabalho são focadas somente as ações operacionais.

Gomes (2005) apresenta no quadro a seguir medidas gerais operacionais que visam a diminuição das perdas de energia dos SAA.

QUADRO 1 – AÇÕES DE ENGENHARIA PARA DIMINUIÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA

Ajuste dos equipamentos	Correção do fator de potência Alteração da tensão de alimentação
Diminuição da potência dos equipamentos	Melhoria no rendimento dos conjuntos motobomba Redução das perdas de carga nas tubulações Melhoria do fator de carga nas instalações Redução do índice de perdas de água Uso racional da água
Automação do sistema de abastecimento de água	----
Alternativas para geração de energia elétrica	Aproveitamento de potenciais energéticos Uso de geradores nos horários de ponta
Redução da altura manométrica	Redução da altura geométrica Redução das perdas de carga
Redução no volume de água distribuído	Controle de perdas de água Uso racional da água

Fonte: Gomes, 2005.

Já em relação às perdas de água, o foco desse trabalho são as perdas reais e o combate destas e pode ser resumido em três conjuntos de ações: controle e detecção de vazamentos através de campanhas de campo; controle de pressão em toda a rede; e melhoria de materiais e equipamentos no sistema de distribuição (tubulações, ligações prediais, válvulas, etc.) (GOMES, 2005).

A seguir são descritas mais detalhadamente algumas ações que visam a redução das perdas de água previamente citadas.

3.3.1.1 Controle e detecção de vazamentos

Os vazamentos de água são considerados perdas físicas e são as principais fontes de perdas de água sem receita nos sistemas de distribuição de água (LAMBERT, 2002). O volume de água perdido dependerá fortemente das características da tubulação e também da política de reparo e detecção da prestadora de serviços de saneamento (TROW; FARLEY, 2004). Fatores importantes que contribuirão para determinar o volume de água perdido são: a pressão na rede; a frequência e as vazões típicas de novos vazamentos; a proporção de novos vazamentos que são reportados; o tempo para que seja noticiado um novo vazamento; o tempo para que o novo vazamento seja localizado; o tempo de reparo; e, a quantidade de vazamentos indetectáveis (TROW; FARLEY, 2004). Fatores externos também podem ser considerados como, a carga de tráfego sobre as tubulações podendo causar falhas nos tubos devido às vibrações e ao carregamento pesado sobre tubos enterrados, entre outros. Além de fatores físicos como o número de conexões, hidrômetros, juntas, o tipo de material dos componentes, diferentes tipos de demanda e muitos outros fatores que podem influenciar significativamente os vazamentos (LAMBERT, 2002).

A Força Tarefa de Perda de Água (*Water Loss Task Force*) da *International Water Association* (IWA) define quatro métodos principais para combater o problema das perdas físicas de água nos sistemas de distribuição: gerenciamento da pressão, controle ativo de vazamentos, rapidez e qualidade dos reparos e, gestão da reabilitação da infraestrutura (KARATHANASI; PAPAGEORGAKOPOULOS, 2016).

O gerenciamento das perdas de água por vazamentos é vista como benéfico tanto para as prestadoras de serviços de saneamento como para os consumidores finais. Com esse gerenciamento, as prestadoras de serviços de saneamento terão

uma fonte adicional de água mais barata sem a necessidade de muito investimento, além de reduzir o risco de rompimento das tubulações e assegurar uma água de boa qualidade aos consumidores finais (XU et al., 2014). Assim, muitos estudos e investigações têm sido realizados a fim de minimizar os vazamentos de água provenientes dos sistemas de distribuição de água, incluindo a detecção ativa de vazamentos, a manutenção ótima de tubos deteriorados e a regulação da pressão (XU et al., 2014).

A detecção de vazamentos se tornou uma rotina nas prestadoras de serviços de saneamento. Porém, a eficiência na detecção de vazamentos pode ser melhorada significativamente se um esquema de detecção ótimo for utilizado, demandando a combinação de instrumentos de detecção e modelos de previsão de falhas nas tubulações (XU et al., 2014).

As técnicas disponíveis de detecção de vazamentos são classificadas em três categorias: monitoramento de ruído, monitoramento de vazão e pressão e outros. As duas primeiras são mais comumente aplicadas.

Em relação ao monitoramento de ruído, os vazamentos podem gerar ruídos quando a água vaza por meio de um furo ou de uma fratura no tubo. Esse ruído pode ser propagado ao longo da tubulação. Assim, detectá-lo poderá ajudar a encontrar o vazamento. Esse método vem sendo utilizado há muitos anos e continua sendo a principal maneira de detectar vazamentos em várias prestadoras de serviços de saneamento. Novas técnicas acústicas, porém, têm sido desenvolvidas para melhorar a eficiência da detecção do ruído. Dispositivos têm sido desenvolvidos para detectar e/ou gravar o ruído. A vantagem dessas novas técnicas é que por se tratarem da utilização de máquinas possuem um aprimoramento da capacidade auditiva e também uma melhoria na precisão e exatidão da localização do vazamento. Embora amplamente utilizada, essa técnica possui a desvantagem de não ser sensível a grandes vazamentos que não produzem vibrações em frequências altas (XU et al., 2014).

Já o monitoramento de vazão e pressão prevê um monitoramento contínuo de vazão e pressão em uma determinada rede de distribuição e caso ocorra algum vazamento ocorrerão alterações nas características hidráulicas que serão detectadas. Por exemplo, se a vazão mínima noturna aumenta repentinamente e mantém esse nível por vários dias consecutivos, isso possivelmente indica a existência de um novo vazamento (ALKASSEH et al., 2013). Além da vazão mínima noturna, um vazamento

pode ser identificado pela análise de mudanças nos padrões de vazão e nas pressões (VAN THIENEN, 2013). Com isso, o método de ondas de pressão transientes é explorado para a identificação de vazamentos nas redes de distribuição de água (GUO et al., 2012). Além dessas técnicas, modelos hidráulicos têm sido desenvolvidos como uma alternativa ao monitoramento direto. A localização e a taxa de vazamento podem ser estimadas pelos modelos a fim de obter um ajuste aceitável para os dados de monitoramento (WU, 2009).

Outras técnicas englobam, por exemplo, algumas evidências visuais como água escoando ou jorrando para a superfície, crescimento anômalo da vegetação, entre outras. Essas observações são usualmente reportadas pela população e possuem um importante papel na detecção de vazamentos, especialmente em países em desenvolvimento. Normalmente essas evidências visuais notam-se apenas quando o vazamento existe a um longo período de tempo (XU et al., 2014).

Embora exista uma variedade de instrumentos disponíveis para o monitoramento e detecção dos vazamentos, estes ainda são caros e/ou exigem mão de obra intensiva. Assim, as prestadoras de serviços de saneamento têm o objetivo de encontrar mais vazamentos com mão de obra e investimento limitados. A solução, portanto, é avaliar o risco de rompimento dos tubos e priorizar as seções a serem monitoradas. Para isso, modelos de avaliação de rompimento de tubos têm sido desenvolvidos para analisar os riscos de rompimento. Esses modelos podem ser agrupados em duas categorias: modelos físicos e modelos estatísticos. Modelos físicos possuem o objetivo de mostrar os mecanismos físicos por trás do comportamento de ruptura da tubulação. As variáveis explanatórias usualmente contêm parâmetros químicos e físicos que descrevem como a capacidade de resistência estrutural dos tubos decresce com processos químicos como a corrosão (RAJANI; MAKAR, 2000), por exemplo. Já os modelos estatísticos empregam indicadores macro a fim de prever rupturas de tubulações sem levar em consideração os mecanismos físicos. Esses indicadores incluem tanto propriedades dos tubos como material, idade, diâmetro, comprimento e número de conexões como variáveis ambientais como tipo de solo e até a interferência de terremotos (XU et al., 2014).

3.3.1.2 Controle de pressão

De maneira geral, a redução de pressão na rede hidráulica para patamares piezométricos aceitáveis é a medida mais eficaz para a redução das perdas físicas de água (ABES, 2009). Estratégias de controle dinâmico da pressão são aplicadas para reduzir o excesso de pressão pelo ajuste da mesma na rede aos níveis requeridos pelo SAA (FELDMAN, 2009). Assim, a redução do excesso de pressão é uma medida que contribui, consequentemente, para a redução dos vazamentos nos SAA (ULANICKI et al., 2000). Além de reduzir os vazamentos existentes e prevenir o aparecimento de novos vazamentos, o gerenciamento da pressão reduz também a incidência de rupturas nas tubulações, evitando custos associados aos reparos bem como a paralisação do tráfego nas vias públicas e do fornecimento de água aos consumidores (ULANICKI et al., 2000).

Um efetivo gerenciamento de pressão é quase sempre parte de uma estratégia de gerenciamento de perdas de água. Uma estratégia de controle de pressão eficiente deve manter a pressão no nó a um nível suficiente para prover a demanda requerida em cada nó, atingindo um padrão de carga ótimo (FONTANA; GIUGNI; PORTOLANO, 2012).

Uma forma comum de reduzir a pressão é posicionar válvulas redutoras de pressão nas redes de água, a qual reduz a capacidade hidráulica total pelo aumento da perda de carga atribuído à seção de contração (FONTANA; GIUGNI; PORTOLANO, 2012). O uso das válvulas redutoras de pressão pode parecer um paradoxo em relação à eficiência energética do sistema, pois a incorporação de perdas de carga menores é considerada um objetivo durante o projeto das redes (VILANOVA; BALESTIERI, 2014). Assim, para que haja sucesso no uso das válvulas redutoras de pressão é importante que sejam feitos a quantificação e o posicionamento dessas válvulas na rede para que produzam os efeitos desejados e simultaneamente mantenham os limites operacionais de pressão em níveis adequados (VILANOVA; BALESTIERI, 2014).

Para tentar evitar essa perda de carga desnecessária causada pelas válvulas redutoras de pressão uma alternativa é a utilização de bombas de rotação variável. Essas bombas possuem um motor acoplado que é controlado pela variação da frequência da unidade de velocidade variável. A principal função da unidade de velocidade variável é alternar o fornecimento de energia para variar a velocidade do

motor enquanto entrega o torque necessário a uma alta eficiência (MARCHI; SIMPSON; ERTUGRUL, 2012). As principais vantagens das bombas de rotação variável são: a economia de energia, em torno de 30 e 50% de economia sendo atingida devido à instalação das bombas de rotação variável no lugar das bombas convencionais; a melhoria no controle, pequenas variações nas pressões nos sistemas de distribuição de água podem ser corrigidas rapidamente porque a velocidade pode ser finamente ajustada; e, a melhoria na confiabilidade da bomba, reduzindo o desgaste da mesma e também os barulhos e vibrações (EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE, 2004). É importante ressaltar, porém, que bombas de rotação variável não são convenientes a todos os sistemas de distribuição de água, se tornando ainda incerta a sua eficiência em sistemas com cargas baixas e sem muitas variações de demanda (EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE, 2004).

3.3.1.3 Uso de equipamentos eficientes

Os conjuntos motobomba são equipamentos cujo consumo de energia elétrica é o mais significativo em instalações de abastecimento de água. São utilizados tanto na captação de água bruta, para levar água até a estação de tratamento, como nas elevatórias de água tratada, para alimentar a rede de distribuição, diretamente, ou através de reservatórios estrategicamente localizados (GOMES, 2009).

Sabe-se que nos países em desenvolvimento as bombas consomem 20% da energia total (KAYA et al, 2008). Assim, com um bom dimensionamento do sistema de bombeamento pode ocorrer uma significativa economia de energia.

O fato das bombas possuírem altas eficiências não é suficiente para que o sistema de bombeamento opere com máxima eficiência. Trabalhar com a máxima eficiência do sistema de bombeamento depende não somente de um bom projeto da bomba, mas também de um bom projeto de todo o sistema e de suas condições de trabalho (KAYA et al., 2008).

Parâmetros como a velocidade específica, a velocidade específica de sucção e o NPSH (*net positive suction head*) influenciam não somente a seleção de bombas centrífugas mais eficientes, mas também a manutenção dos níveis de eficiência e de redução de períodos de reparo durante a vida útil dos equipamentos (DE LA TORRE, 2008).

O uso eficaz das bombas deve ser considerado em dois estágios: projeto e operação (KAYA et al., 2008). Para um projeto eficiente, deve-se selecionar uma bomba de capacidade adequada e tipo e projeto de instalação de tubulação; um motor elétrico com potência adequada e com alta eficiência; e, um sistema com taxa de fluxo variável (KAYA et al., 2008).

Convém observar que a simples substituição de equipamentos não garante necessariamente melhora na eficiência, visto que as condições do sistema podem ser limitantes da eficiência do equipamento, seja por questões operacionais, ou por questões físicas decorrentes do estado, especificação e dimensionamento de tubulações (GOMES, 2009).

3.3.1.4 Gestão da demanda

Na maior parte do século 20, a gestão da demanda de água não recebeu muita atenção. Os planejadores dos SAA simplesmente calculavam a demanda futura multiplicando o consumo per capita de água pela população a ser servida (STAVENHAGEN; BUURMAN; TORTAJADA, 2018). A infraestrutura de água, como reservatórios e tubulações, foi, então, construída para armazenar e transportar a quantidade de água necessária (GLEICK, 2000).

Nos anos 70 e 80, entretanto, uma combinação de fatores levaram os planejadores a repensar o foco da gestão de demanda, sendo estes: redução dos recursos hídricos inexplorados próximos às cidades, restando somente os mais difíceis de serem acessados; contaminação e/ou depleção dos recursos hídricos subterrâneos, limitando ainda mais a oferta disponível; aumento das secas e uma concorrência mais intensa entre os usuários de água dos setores urbano, industrial e agricultura; uma crescente conscientização a respeito dos custos ambientais dos empreendimentos de infraestruturas hídricas em larga escala; maior compreensão do público sobre a interdependência da água com um ecossistema funcional e com a saúde humana; e, altos custos na construção e manutenção das infraestruturas hídricas; reduziram, com isso, o entusiasmo para investimentos provenientes das prestadoras de serviços de saneamento (BAUMANN; BOLAND; HANEMANN, 1998). O resultado, portanto, foi uma mudança de foco, ao invés de realizar um aproveitamento dos recursos hídricos não explorados, optou-se por encontrar novas maneiras de atender as demandas de água com menos recursos, com um baixo custo

e com menor deterioração ambiental (STAVENHAGEN; BUURMAN; TORTAJADA, 2018).

Assim, o conceito base da gestão da demanda é a conservação de água, isto é, qualquer redução benéfica no uso da água ou nas perdas de água (BAUMANN; BOLAND; HANEMANN, 1998). A gestão de demanda é qualquer medida (administrativa, econômica, financeira, técnica ou social) que atenda a um ou mais dos seguintes objetivos: (1) redução da quantidade ou qualidade da água requerida para realizar uma tarefa específica; (2) ajustar a natureza de uma determinada tarefa, sendo possível realizá-la com menos quantidade ou menor qualidade de água; (3) redução das perdas de água desde a extração, uso e até a disposição final; (4) alteração no tempo de uso para períodos fora do pico; e (5) aumento da habilidade do sistema em operar durante secas (BROOKS, 2006).

A gestão da demanda, então, coloca a própria demanda de água, e não soluções estruturais, como o centro da abordagem. Representando, portanto, a forma mais barata de se obter rapidamente água disponível, particularmente em áreas em que as demandas adicionais estão sendo retiradas de recursos hídricos que já estão nos seus limites (BUTLER; MEMON, 2006). Assim, a gestão da demanda é um componente essencial do gerenciamento hídrico urbano integrado para o desenvolvimento sustentável (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009).

Reduzir a demanda de água não somente torna disponível uma quantidade adicional de água para abastecer áreas que anteriormente não eram abastecidas como também reduz o custo do tratamento (uso de químicos) e da energia e adia a necessidade de altos investimentos de capital para empreendimentos de infraestrutura de fornecimento de água. A abordagem integrada da gestão da demanda costuma frequentemente ter um bom custo benefício e ser favorável ao meio ambiente comparativamente à gestão de demanda de água tradicional (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009). A gestão integrada, ainda, reduz a geração de poluentes e conseqüentemente a necessidade de expansão ou de novas estações de tratamento de água.

Comumente as medidas da gestão da demanda integrada são agrupadas em três categorias: (i) medidas estruturais e técnicas (controle de vazamentos, uso de dispositivos economizadores, gerenciamento dos hidrômetros, uso de fontes alternativas de água); (ii) medidas econômicas e financeiras (preço da água, taxas e incentivos); (iii) medidas sócio-políticas (políticas e enquadramentos legais que

promovam a conservação da água, programas educacionais, campanhas de sensibilização, projetos demonstrativos) (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009).

Isso demonstra claramente que a gestão da demanda integrada é uma atividade multidisciplinar e multidimensional que exige o engajamento ativo de todos os *stakeholders* envolvidos no setor urbano de água (agências governamentais, prestadoras de serviços de saneamento, setores privados, ONGs e a comunidade e os consumidores beneficiários) (BROOKS, 2006).

Evidencia-se, atualmente, em todo o mundo que é mais barato, mais rápido e melhor aumentar a eficiência no uso da água do que continuar dependendo de novas fontes de fornecimento para atender as demandas da população crescente (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009). Existe um benefício econômico a ser ganho pelo investimento em eficiência hídrica, e historicamente muito tem sido gasto em infraestrutura de fornecimento de água e quase nada em eficiência hídrica em áreas urbanas. Reduzir a quantidade de água utilizada em banheiros e eliminar os vazamentos nos sistemas de distribuição de água são as duas principais abordagens de conservação de água em áreas urbanas (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009).

Diferentes tipos de economizadores de água como descargas com duplo acionamento de vazão ou volume de descarga reduzido, chuveiros, torneiras, máquinas de lavar roupas e de lavar louças estão disponíveis no mercado e podem reduzir o uso doméstico e comercial de água substancialmente (BRANDES; MAAS; REYNOLDS, 2006). Além disso, alternativas sanitárias diferentes como sistemas de separação de urina e sanitários secos podem contribuir para a conservação de água. Entretanto, ainda há uma falta de conscientização dos projetistas, engenheiros e planejadores sobre a disponibilidade e o potencial desses dispositivos economizadores. Também deve ser notado que alguns desses dispositivos não são atraentes aos consumidores finais devido ao seus relativos custos altos. Contudo, os consumidores devem ser conscientizados de que o alto custo inicial da substituição dos antigos dispositivos por dispositivos economizadores de água pode ser rapidamente recuperado em um curto período de tempo pela redução da conta de água associada às economias de água produzidas por esses dispositivos (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009).

Em relação às medidas econômicas e financeiras, estas incluem a provisão de incentivos como descontos e créditos fiscais e/ou desincentivos como custos reais, penalidades e multas a fim de promover o uso eficiente da água. Colocar um valor

econômico na água é um dos meios mais importantes e diretos de controlar a demanda de água e gerar receita (ARBUÉS; VILLANÚA, 2006). Porém, deve ser notado que esse não é o método mais efetivo sem a combinação de regulações complementares, campanhas educativas, detecção de vazamentos, e outras melhorias técnicas (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009).

Além disso, indústrias que fabricam dispositivos economizadores de água devem ser promovidas e créditos fiscais ou subsídios devem ser fornecidos para os consumidores que desejam utilizar esse tipo de produto. Essas medidas devem ser complementares a outras (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009).

Já as medidas sóciopolíticas incluem uma combinação de diversas intervenções como políticas, regulações, leis, educação e comunicação que são complementares às medidas estruturais e econômicas. Políticas econômicas, regulações governamentais e leis, padrões de fornecimento de água e a aplicação de um redesenho e *marketing* podem promover os dispositivos economizadores de água e encorajar a economia e a reciclagem de água nas indústrias. Deve haver também um programa educacional e de sensibilização do público sobre o uso racional da água e as restrições desse uso durante períodos de escassez (BRANDES; MAAS; REYNOLDS, 2006). Educação escolar, programas de rádio e televisão, tarifas de água, mensagens escritas nas contas de água, panfletos, inserções em jornais e sites e projetos de demonstração são algumas maneiras de sensibilização (SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2009).

3.3.2 Indicadores de sustentabilidade relacionados aos SAA

Nessa seção são apresentados os indicadores utilizados na literatura de ordem técnica, social, ambiental e financeira.

3.3.2.1 Indicadores de eficiência hidroenergética

A *International Water Association* (IWA), referência internacional em termos de medição de desempenho de SAA, propôs uma série de indicadores de desempenho para SAA.

O sistema incorpora seis grupos de indicadores: indicadores de recursos hídricos, de recursos humanos, infraestruturais, operacionais, de qualidade de serviço e econômico-financeiros. No total são 158 indicadores.

Dentre esses indicadores, destacam-se o Consumo Específico de Energia Elétrica (CE) e o Consumo Específico Normalizado de Energia Elétrica (CEN).

O CE é um indicador de desempenho passível de comparação a padrões estabelecidos internacionalmente. Para a composição deste indicador são necessários registros de grandezas físicas durante o mesmo período de tempo (GOMES, 2009). Para o cálculo do CE, faz-se:

$$CE = \frac{P_a \times t}{V} \text{ (kWh/m}^3\text{)}$$

Em que,

P_a é a potência elétrica medida (kW);

t é o tempo de bombeamento (h);

V é o volume bombeado (m³).

O CE representa a quantidade média de energia requerida para elevar um metro cúbico de água por meio de instalações de bombeamento. Esse indicador reflete a eficiência do conjunto motobomba unida à eficiência do sistema hidráulico à jusante da bomba, sendo útil para acompanhar o desempenho de uma mesma instalação de bombeamento ao longo do tempo. Porém, não se presta a comparar o desempenho de estações de bombeamento distintas, sendo essa sua principal limitação (GOMES, 2009).

No intuito de contornar a limitação do CE, a IWA propôs o artifício de reduzir as alturas manométricas a um altura única, de modo a permitir a comparação de seus desempenhos. Assim, foi definido como a quantidade média de energia gasta para elevar 1 metro cúbico de água a 100 m de altura por meio de instalações de bombeamento (GOMES, 2009). Esse indicador é calculado pela seguinte equação:

$$CEN = \frac{P_a \times t}{V \times \frac{H_{man}}{100}} \text{ (kWh/m}^3\text{/100)}$$

Em que,

H_{man} é a altura manométrica de recalque (m).

3.3.2.2 Indicadores sociais

Os indicadores sociais irão relacionar as questões sociais com as ações de eficiência hidroenergética em SAA, podendo incluir aspectos relacionados ao acesso aos serviços de abastecimento de água, à satisfação das necessidades e expectativas dos consumidores, à aceitação do público e ao papel relevante da comunidade desses serviços (CRUZ; MARQUES, 2014).

Como exemplo, pode-se citar o indicador Cobertura Populacional, quanto melhor for o desempenho hidroenergético do SAA, maior será a Cobertura Populacional deste. Outro exemplo que pode ser dado é o Índice de Mortalidade Infantil, diretamente relacionado à qualidade do saneamento do meio em que determinadas crianças vivem, consequentemente um SAA com um bom desempenho hidroenergético, que seja capaz de fornecer água com qualidade para uma determinada população, terá como consequência a redução do Índice de Mortalidade Infantil.

3.3.2.3 Indicadores ambientais

A dimensão ambiental diz respeito ao impacto dos SAA no sistemas naturais vivos e não vivos e engloba a otimização do uso da água, energia e materiais e a minimização dos impactos negativos à jusante (CRUZ; MARQUES, 2014). Outras abordagens como a biodiversidade podem ser incluídas também. Assim, podem ser considerados como indicadores ambientais a vazão que é captada dos mananciais, a energia consumida pelos SAA, entre outros.

3.3.2.4 Indicadores financeiros

Na dimensão econômica podem ser incluídos todos os objetivos relacionados às questões financeiras e econômicas, como o custo total de implantação, a recuperação total dos custos, entre outros (CRUZ; MARQUES, 2014).

3.4 PROGRAMAS DE CONSERVAÇÃO DA ÁGUA EM MEIO URBANO

Existem vários programas que propõem medidas de conservação da água no Brasil.

O Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA) aparece na esfera federal e tem por objetivo geral promover o uso racional da água de abastecimento público nas cidades brasileiras, em benefício da saúde pública, do saneamento ambiental e da eficiência de serviços, propiciando a melhor produtividade dos ativos existentes e a postergação de parte dos investimentos para a ampliação dos sistemas (GONÇALVES; DE AMORIM, 1999).

Já o Programa de Uso Racional da Água (PURA), destaca-se em nível estadual, tendo sido desenvolvido em São Paulo. Esse programa tem o intuito de promover um conjunto de ações em relação ao uso racional da água em nível dos sistemas prediais.

Além disso, cabe destacar também o Programa de Conservação da Água para um Meio Urbano Sustentável (CAMUS), pois foi inspirado nesse programa a elaboração da ferramenta proposta nessa tese (SANTOS, 2015).

3.4.1 Programa de Conservação da Água para um Meio Urbano Sustentável – CAMUS

Esse programa tem como referência o emprego de uma ferramenta de apoio ao planejamento e gestão de ações de conservação da água em áreas urbanas e periurbanas (SANTOS, 2016).

O CAMUS objetiva o planejamento e a gestão das ações de conservação da água por meio de uma hierarquização das mesmas sob aspectos de viabilidade econômica, do benefício gerado e do risco sanitário associado. O programa foca o uso da água na infraestrutura sanitária urbana e nas edificações.

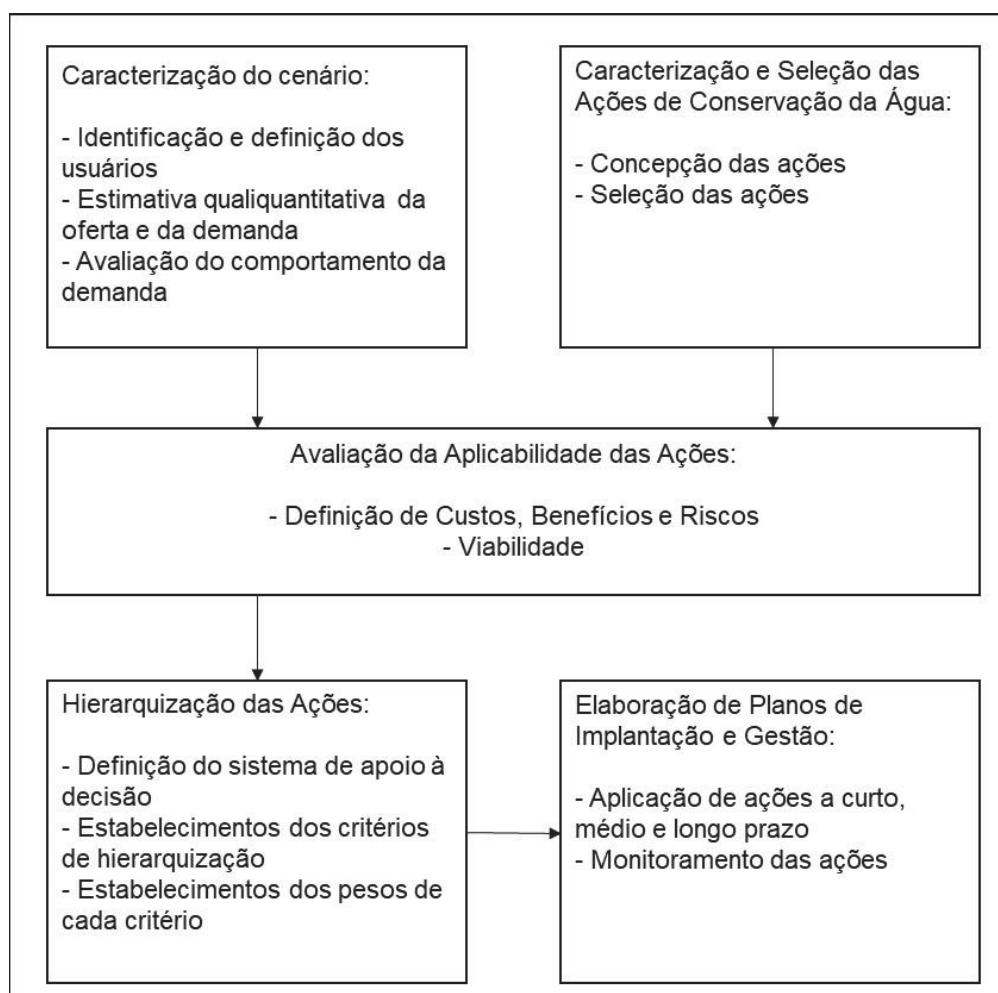
Nos SAA destacam-se ações voltadas para o combate ao desperdício de água por perdas físicas nas redes de distribuição. Nos sistemas de esgotamento sanitário (SES) são consideradas ações que preveem o reuso da água. No caso dos sistemas de drenagem urbana (SDU) são previstas análises de ações respectivas à aplicação dos SUDS (*Sustainable Drainage Systems*). E, por fim, nas edificações, os

procedimentos consideram ações de conservação da água pelo uso racional e pela utilização de fontes alternativas (SANTOS, 2016).

Esses programas podem ser aplicados separadamente ou conjuntamente dependendo do objetivo do gestor que irá aplicá-los.

O CAMUS prevê uma série de etapas que almejam a gestão do uso da água na infraestrutura sanitária urbana. Ao todo são cinco etapas, apresentadas na FIGURA 7: caracterização do cenário, caracterização das ações de conservação da água, avaliação da aplicabilidade, hierarquização e planejamento e gestão (SANTOS, 2016).

FIGURA 7 – ESTRUTURA DO CAMUS



FONTE: Santos, 2016.

Na etapa de Caracterização do Cenário devem-se observar vários critérios:

- Identificação e Descrição dos Usuários: identificar e descrever os usuários por tipo de demanda;
- Avaliação do Perfil e da Aceitabilidade do Usuário: avaliar aspectos sociais, econômicos e técnicos relacionados ao usuário, assim como a aceitabilidade do mesmo em relação às ações de conservação da água;
- Estimativa Qualiquantitativa da Demanda de Água: tratam-se de estimativas para avaliar a demanda de água por usuário, em seus aspectos qualitativos e quantitativos. Isso permite tanto o levantamento do histórico do consumo quanto à parametrização (estimativa de volume consumido por uso) do mesmo;
- Prospecção de Relações entre o Consumo de Água e Variáveis Diversas: análise estatística desenvolvida no intuito de avaliar a influência sobre o consumo de água de variáveis diversas como a sazonalidade, a temperatura ambiente, os dias do mês, etc. São utilizadas a Correlação e a Análise de Regressão para tanto.
- Caracterização do meio antrópico: caracterizar aspectos físicos, sociais, culturais, econômicos e ambientais. A prospecção dos dados pode ocorrer por meio de registro de dados ou em campo.
- Avaliação qualiquantitativa da oferta de água: avaliar a oferta de água pelos recursos hídricos naturais, além da estimativa de volumes de água servida que podem ser utilizados. A avaliação quantitativa sobre os recursos hídricos naturais se dá a respeito de dados de vazão de captação, enquanto a avaliação qualitativa é conduzida sobre a oferta da água nas edificações via utilização de fontes alternativas, e sobre a oferta de esgoto tratado nas estações de tratamento (SANTOS, 2016).

A etapa de Caracterização das Ações de Conservação de Água inclui as ações de economia e as de proteção ambiental. As ações de economia subdividem-se em uso racional e uso de fontes alternativas. Já, as ações de proteção ambiental subdividem-se em tratamento e disposição final dos efluentes. Esse processo de caracterização ocorre em duas etapas, Concepção e Seleção das Ações de Conservação de Água e Caracterização das Ações Seleccionadas. A fim de desenvolver esses processos de caracterização das ações, aplica-se a Planilha de

Caracterização que permite organizar o conjunto de informações necessárias junto ao cenário sob análise (SANTOS, 2016).

Na Avaliação da Aplicabilidade das Ações de Conservação da Água, as ações são avaliadas em função tanto dos requisitos qualitativos e quantitativos impostos pelos usos previstos quanto de uma análise da relação custo-benefício-risco pertinente (SANTOS, 2016).

Depois de avaliada a aplicabilidade das ações de conservação de água são necessárias hierarquizá-las quanto à preferência em uma escala temporal. Na Hierarquização de Ações de Conservação de Água, é importante a utilização de sistemas de apoio à decisão para o planejamento e posterior confecção do Plano de Conservação da Água no Meio Urbano. Nesse sentido, originalmente o CAMUS apresenta o UWU como um sistema de apoio à decisão para a condução do processo de hierarquização. Sendo que o UWU é baseado em quatro etapas, a entrada de dados, as equações que associam indicadores, medidas de conservação da água e cenários, a saída dos resultados e a avaliação destes (SANTOS, 2016).

Por último, na etapa de Planejamento e Gestão da Conservação de Água, torna-se possível propor um planejamento otimizado que promova a economia esperada e garanta segurança sanitária. Nesse plano serão apresentadas diretrizes para o gerenciamento de conservação da água no meio urbano, as quais são definidas a partir da hierarquização constatada pela aplicação do UWU. Com esse plano é possível organizar um cronograma de aplicação das ações de conservação da água ao longo do tempo, além de um programa de monitoramento das ações e de seus efeitos (SANTOS, 2016).

3.5 SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO (SAD)

Todos são tomadores de decisão. Qualquer ação que é realizada provém de uma decisão tomada. Para tomar uma decisão, todas as informações obtidas nos ajuda a fundamentar essa decisão. Nem toda a informação obtida, porém, é útil para a melhoria do entendimento e julgamento de determinada ação (SAATY, 2008). Para tomar uma decisão é preciso conhecer o problema, a necessidade e o propósito da decisão, os critérios da decisão, os subcritérios, as partes interessadas e os grupos afetados, assim como as ações alternativas a serem tomadas (SAATY, 2008). Após isso, tenta-se determinar a melhor alternativa.

A tomada de decisão nos dias atuais tornou-se uma ciência matemática (BRUNELLI, 2015). Ela envolve muitos critérios e subcritérios usados para ranquear as alternativas de uma decisão (SAATY, 2008). Os critérios devem ser intangíveis e não possuírem medições para servirem como um guia para ranquear as alternativas e criar prioridades para os próprios critérios a fim de ponderar essas prioridades e, com isso, obter o desejado ranqueamento das alternativas (SAATY, 2008).

Diversas disciplinas e metodologias têm sido desenvolvidas para a construção de modelos de decisão, tais como: árvores de decisão, teoria dos jogos e programação linear (COSTA, 2002).

A mais recente vertente do desenvolvimento metodológico no contexto da tomada de decisão caracteriza-se por abordar a solução de problemas decisórios à luz de vários critérios (COSTA, 2002).

Existem diversas vertentes e fontes de pesquisa de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão, porém as principais linhas de estudo são a Escola Americana e a Escola Francesa, as quais são representadas pelos métodos: Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* – AHP), os métodos da família ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality*), o método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) e o método Macbeth (COSTA, 2002).

No QUADRO 2 é apresentada uma comparação teórica entre três destes, o AHP, o Electre e o Promethee.

QUADRO 2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS AHP, ELECTRE E PROMETHEE

Características de desempenho	AHP	ELECTRE	PROMETHEE
Entrada de dados (Inputs)			
Quantidade de julgamentos em problemas com muitos critérios e alternativas	Alta	Baixa	Alta
Necessidade de processar dados	Não	Sim	Sim
Utilização de dados quantitativos e qualitativos	Sim	Sim	Sim
Utilização de decisões em vários níveis hierárquicos	Sim	Não	Não
Saída de dados (Outputs)			
Problemas com avaliação de desempenho	Sim	Não	Não
Proporciona a eliminação de alternativas	Não	Sim	Não
Permite avaliação de coerência dos julgamentos	Sim	Não	Não
Interface do decisor versus método			
Disponibilidade de <i>software</i> gratuito	Sim	Não	Sim
Utilização de decisão em grupo	Sim	Não	Não
Número de publicações científicas	Alto	Média	Baixa

FONTE: adaptado de ALVES, L. G. K. et al. (2007).

De acordo com o QUADRO 2, observa-se que os três métodos apresentam vantagens e desvantagens. Porém, como o AHP é o único que permite uma alta quantidade de julgamentos em problemas com muitos critérios e alternativas, a utilização de decisões em vários níveis hierárquicos e a avaliação de coerência de julgamento, foi o método multicritério escolhido para ser utilizado nessa tese. Além, ainda, de possuir *software* gratuito, ser possível a utilização de decisão em grupo e por fim, por ser um dos métodos mais utilizados e difundidos no mercado mundial, possuindo um alto número de publicações científicas.

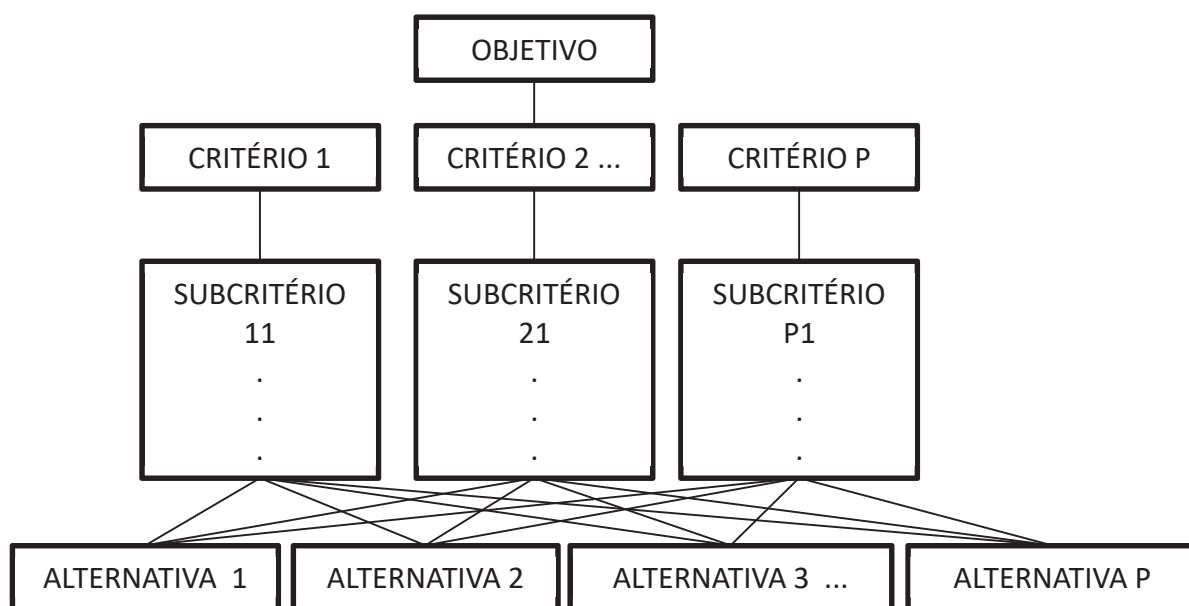
Além disso, foi um método pioneiro, tendo sido desenvolvido em meados da década de 1970 pelo pesquisador americano Thomas L. Saaty, quando se começava a abordar problemas complexos sob a visão de múltiplos critérios simultâneos, e também devido ao seu caráter simples e intuitivo, pois ao conhecer suas premissas, rapidamente o usuário começa a utilizá-lo, estruturando critérios, atribuindo valores e selecionando alternativas (COSTA, 2002).

3.5.1 Método da Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* – AHP)

O Método AHP está fundamentado na intuição humana, isto é, baseado na reflexão que envolve a identificação de objetos ou ideias e o relacionamento entre elas. A técnica fundamental da percepção é a decomposição e a síntese, as quais fazem parte da lógica humana (SAATY, 1980).

Primeiramente, o problema é decomposto em uma hierarquia de objetivo, critérios, subcritérios e alternativas. Essa é a parte mais importante e criativa da tomada de decisão. Estruturar o problema decisório como uma hierarquia é fundamental no processo do AHP. A hierarquia indica a relação entre os elementos de um nível com aqueles elementos de um nível imediatamente abaixo. Essa relação passa para os níveis abaixo da hierarquia e, dessa maneira, todo elemento é conectado a outro, pelo menos de uma forma indireta. A hierarquia é uma forma mais ordenada de rede (BUSHAN; RAI, 2003). A FIGURA 8 mostra uma estrutura hierárquica genérica.

FIGURA 8 – ESTRUTURA HIERÁRQUICA GENÉRICA



FONTE: adaptado de BHUSHAN; RAI, 2003

Observando a FIGURA 8, a raiz da hierarquia é a meta ou o objetivo do problema a ser estudado e analisado. Os nós de baixo são as alternativas a serem comparadas. Entre esses dois níveis estão vários critérios e subcritérios. É importante notar que quando se comparam elementos em cada nível, o tomador de decisão apenas compara com respeito aos elementos do nível inferior ao nível superior a esse (BHUSHAN; RAI, 2003).

Em um segundo momento, dados são coletados de peritos ou tomadores de decisão correspondendo à estrutura hierárquica, na comparação emparelhada das alternativas em uma escala quantitativa. Peritos podem classificar as comparações como igual, levemente forte, forte, muito forte e extremamente forte. As comparações são feitas para cada critério e convertidas em números como mostrado no QUADRO 3 conforme segue.

QUADRO 3 – ESCALA DE JULGAMENTOS DE IMPORTÂNCIA DO MÉTODO AHP

Intensidade de importância	Definição	Significado
1	Importância igual	Dois critérios/alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância levemente forte sobre a outra	A contribuição de um dos critérios/alternativas é levemente superior à do outro
5	Importância forte	Um critério/alternativa é fortemente favorecido em comparação com outro
7	Importância muito forte	Um critério/alternativa é favorecido muito fortemente sobre o outro
9	Importância extremamente forte	A importância/preferência de um critério/alternativa domina em absoluto o outro
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos	Valores utilizados quando o julgamento está entre dois valores ímpares
Recíprocos	Se a alternativa i tem uma das intensidades de importância ou de preferência de 1 a 9, quando comparada com j, então j tem o valor recíproco quando comparado com i	
Racionais	Proporção quando surgem na escala	Se consistência tiver que ser forçada para obter n valores numéricos para completar a matriz

FONTE: SAATY, 1980

De acordo com Saaty (1980), existem algumas razões para o limite 9 estipulado na escala:

- As distinções qualitativas são significativas na prática e têm característica de precisão, quando os itens comparados apresentam a mesma ordem de magnitude ou estão próximos com relação à propriedade usada para fazer a comparação;
- Nota-se que a habilidade do ser humano para fazer distinções qualitativas é bem representada por cinco atributos, sendo eles: igual, fraco, forte, muito forte e extremamente forte. Dessa forma, podem-se estabelecer compromissos entre atributos adjacentes quando uma precisão maior for necessária;
- Com a finalidade de reforçar o item anterior, um método prático frequentemente utilizado para avaliação é a classificação de estímulos, tais como: rejeição, indiferença e aceitação. Para melhor classificação, cada um desses estímulos é dividido em: baixo, médio e alto. Assim sendo, são indicadas 9 áreas de distinções significativas;
- O limite psicológico de 7 ± 2 itens em uma comparação simultânea sugere que ao se tomar mais do que $7 + 2$ itens satisfazendo a descrição do

primeiro item, e se eles diferirem entre si levemente, o ser humano precisará de nove pontos para distinguir essas diferenças.

Depois de estruturado o problema por meio da árvore hierárquica e conhecendo-se a escala do QUADRO 3, obtém-se a matriz de julgamento para cada critério em cada nível. A matriz possui a forma abaixo:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Essa matriz deve atender:

- Se $a_{ij} = \alpha$, então $a_{ji} = 1/\alpha$, sendo $\alpha \neq 0$;
- Se C_i (Critério i) tem igual importância que C_j (Critério j), então $a_{ij} = 1$ e $a_{ji} = 1$ para todo i .

Sendo que,

a_{ij} = comparação paritária entre os critérios C_i e C_j ;

α = valor de intensidade de importância.

Cada julgamento a_{ij} deve ser considerado como uma estimativa de importância entre o critério i em relação ao critério j , identificados na linha i e na coluna j , respectivamente relativo ao critério do nível imediatamente acima.

Para realizar o julgamento deve-se, primeiramente, fazer um levantamento da importância geral, também denominada meta, com relação aos critérios, os quais fazem parte do segundo nível; e, depois, fazer outro levantamento sobre a importância de cada critério, pertencentes ao segundo nível, com relação a cada alternativa, as quais pertencem ao terceiro nível. No caso de existirem mais níveis o processo será o mesmo.

Depois de feito o julgamento, o problema concentra-se na obtenção dos pesos $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$, que são obtidos por meio do autovetor associado ao autovalor, ou valores de prioridade e determinam a escala de prioridade.

Esses pesos devem ser normalizados para obtenção de valores em uma única unidade de medida. A normalização transforma os valores encontrados em valores semelhantes com o objetivo de obtenção de uma resposta mais precisa (SAATY; VARGAS, 2001).

A normalização de um autovetor consiste em deixar todas as suas coordenadas com valores entre zero e um. Para isso, é necessário somente dividir cada coordenada do autovetor pelo somatório de todas as coordenadas. Com isso, o somatório das coordenadas do novo autovetor será sempre igual a um.

3.5.1.1 Análise de Consistência do Método AHP

De acordo com o resultado que uma matriz A de comparação fornece, o seu máximo autovalor, $\lambda_{\text{máx}}$, é igual a n se e, somente se, a matriz for consistente. Para isso, Saaty (1980) propôs um Índice de Consistência (IC).

$$IC(A) = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

Em que:

n = ordem da matriz

$\lambda_{\text{máx}}$ = maior autovalor da matriz

Já, a Razão de Consistência (RC) pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$RC(A) = \frac{IC(A)}{IR}$$

Em que:

IC = índice de consistência

IR = índice randômico

O valor de IR pode ser obtido da TABELA 1, resultado do estudo do Dr. R. Uppulury do Oak Ridge Natinal Laboratory, que trabalhou estatisticamente com 100 amostras de matrizes que variam sua ordem de 1 a 15. Essas matrizes, por serem randômicas, têm a pior média de consistência.

TABELA 1 – RELAÇÃO ENTRE A ORDEM DA MATRIZ E O ÍNDICE RANDÔMICO

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

FONTE: SAATY, 1980

Quando o valor de RC for igual a zero, ela é considerada consistente. Já, caso esse valor seja inferior a 0,1, ela é considerada aceitável. É importante ressaltar que esse índice trata-se de um fator de alerta para o decisor e não de um erro não desejado.

3.5.1.2 Trabalhos acadêmicos utilizando o AHP na área de abastecimento de água

Recentemente muitos artigos têm sido publicados principalmente em revistas internacionais a respeito da utilização do AHP na área de abastecimento de água. Nessa seção serão apresentados alguns destes, publicados no período de 2015 a 2018.

Kilinç et al. (2018) avaliou a performance técnica dos tubos em sistemas de distribuição de água pelo AHP na cidade de Malatya na Turquia. Sabe-se que tubos em más condições causam problemas operacionais significativos em sistemas de distribuição de água e também perdas de água. Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar a performance técnica dos tubos em termos de três fatores principais, a saber, fatores físicos, operacionais e ambientais e diversos subfatores. Os subfatores utilizados para o fator principal físico foram diâmetro, idade, comprimento e material do tubo; do fator principal ambiental foram tipo de solo, intensidade de tráfego, largura da estrada e condição da superfície da estrada; já os subfatores do fator principal operacional utilizados foram taxa de falha, número de interrupções no abastecimento de água e pressão do sistema (KILINÇ et al., 2018). Após a definição dos fatores e subfatores, foram dados pesos a todos estes. Para isso foi utilizada a opinião de engenheiros e gestores que trabalharam na área de gerenciamento de água, gerenciamento de rede e de vazamentos e campos de aplicação de fornecimento de água (KILINÇ et al., 2018). Após o julgamento dos especialistas a respeito dos pesos dados aos fatores e subfatores, obteve-se valores de 0,43 para o fator físico, 0,14 para o fator ambiental e 0,43 para o fator operacional. Com isso, foi calculado uma pontuação de avaliação de desempenho usando as pontuações definidas para os três fatores principais e aplicada em 17 tubos selecionados a fim de testar suas performances técnicas. Os tubos de ACP (tubos de cimento amianto) e de PVC obtiveram as piores performances técnicas e o risco de deterioração foi considerado alto (KILINÇ et al., 2018).

Outro recente estudo foi o de Boukhari et al. (2017) em que o objetivo foi desenvolver uma ferramenta metodológica para uma avaliação completa da sustentabilidade dos serviços de fornecimento de água e saneamento considerando todos os fatores quantitativos e qualitativos usando o AHP. Com esse método no qual são determinados quais aspectos são mais prioritários e quais são menos importantes, é possível obter uma boa diretriz para o planejamento e a implementação de projetos no país para o desenvolvimento sustentável dos serviços de fornecimento de água e saneamento. O método proposto foi testado na Argélia. A fim de obter a avaliação completa foram definidas 6 dimensões (econômica, ambiental, social, técnica, governamental e institucional), 12 critérios (recuperação total de custos, autonomia financeira, impacto ambiental, uso de recursos, acessibilidade aos serviços, acessibilidade, performance técnica, modernização, transparência, política e planejamento dos serviços de fornecimento de água e saneamento, regulações e organização) e 50 indicadores. As matrizes de comparações foram obtidas pelo julgamento de 12 peritos envolvidos em diferentes campos incluindo decisores políticos, gestores e cientistas. De acordo com os julgamentos obtidos, as dimensões mais importantes foram a econômica (38,3%) e a técnica (26,1%) (BOUKHARI et al., 2018). Já os critérios autonomia financeira (18,7%) e performance técnica (18,4%) tiveram as maiores pontuações e os critérios transparência (2%) e organização (2,8%) as menores pontuações dentre os critérios analisados (BOUKHARI et al., 2018). Além disso, os indicadores custo de operação e manutenção, orçamento balanceado, confiabilidade, saldo orçamentar pequeno, custo de oportunidade e taxas de subsídio estatal para investimentos obtiveram no geral grandes pesos (BOUKHARI et al., 2018).

Sutadian et al. (2017) apresentou um estudo a respeito de um dos mais importantes passos no desenvolvimento de índices de qualidade da água (IQA), o estabelecimento de pesos aos parâmetros de qualidade da água. Para isso, o AHP foi utilizado para calcular os pesos baseados em 13 parâmetros selecionados dentro de 7 grupos de qualidade da água (físico, depleção de oxigênio, nutrientes, orgânicos, íons e minerais, metais pesados e microbiologia) para os rios de West Java, Indonésia. Para julgar esses parâmetros, foram usados quatro grupos diferentes de *stakeholders*, foram eles, oficiais do governo, acadêmicos, pesquisadores e consultores. Esses grupos foram escolhidos e convidados a responder um questionário, pois são grupos que influenciam as decisões relacionadas à gestão da qualidade da água na região.

Foram feitos dois modelos de AHP nesse estudo, no primeiro haviam 13 comparações par a par a serem respondidas (forma individual) e no segundo haviam 7 comparações (forma em grupo). No primeiro modelo do AHP, a demanda química de oxigênio (DQO) e o oxigênio dissolvido (OD) receberam os pesos mais altos comparados aos outros parâmetros (SUTADIAN et al., 2017). Já no segundo modelo, a depleção de oxigênio e a microbiologia obtiveram os maiores pesos (SUTADIAN et al., 2017). Como o segundo modelo do AHP consegue fornecer pesos individuais tão bem quanto para os grupos de parâmetros individuais, esse modelo foi o preferido no estudo. Portanto, os resultados do segundo modelo do AHP serão utilizados nas etapas restantes no desenvolvimento de índices de qualidade de água de West Java no futuro (SUTADIAN et al., 2017).

Outro artigo publicado da área foi o de Zyoud et al. (2016), no qual o AHP é utilizado para a tomada de decisão no gerenciamento de perdas de água de sistemas de fornecimento de água intermitentes. Com o aumento da demanda de água e em paralelo com a escassez de água que vem ocorrendo, os serviços de água nos países em desenvolvimento são forçados a seguir técnicas complexas de operação e distribuição das quantidades de água requeridas. A redução das perdas de água nos SAA pode ajudar a preencher o buraco entre o fornecimento e a demanda (ZYLOUD et al., 2016). Essa estratégia é caracterizada pela variedade de opções e identificar a opção mais apropriada é um processo demorado. Para facilitar esse processo, portanto, o AHP foi aplicado a fim de priorizar as opções de redução de perdas de água para a rede de fornecimento de água intermitente na Palestina. As opções de redução de perdas de água foram selecionadas após uma pesquisa na literatura a respeito de publicações recentes na área de gerenciamento de perdas de água. Foram selecionadas 10 opções: controle ativo de vazamentos, controle passivo de vazamentos, controle e gerenciamento operacional de pressão, estabelecimento de áreas de medição distritais, gerenciamento de ativos para linhas de serviço e redes seletivas, substituição de hidrômetros, melhoria do nível de qualidade dos reparos e minimização do tempo requerido pelo reparo, controle do uso ilegal do serviço de água, utilização de técnicas avançadas para consertar e prever os vazamentos e, conscientização pública e campanhas educativas. Os critérios pelos quais as opções selecionadas serão avaliadas foram classificados em quatro categorias (econômica, ambiental, técnica e socioeconômica) e são eles, a saber, geração de receita, figura de custo, custos de operação e manutenção, período de benefício, preservação da

água e redução de resíduos, energia economizada, confiabilidade de fornecimento, flexibilidade, acessibilidade e qualidade da água. A metodologia proposta foi aplicada ao sistema de distribuição de água de Nablus, Palestina. Quatro grupos dos atores mais influentes do setor foram envolvidos na avaliação da estratégia de gerenciamento de perdas de água. Os grupos envolvidos foram decisores políticos representado pela Autoridade Hídrica da Palestina, atores da Diretoria de Controle Hídrico, grupos ambientais representados pelo Grupo Hidrológico Palestino e o operador do sistema de fornecimento de água da cidade. Os resultados mostraram que o plano estratégico que compreende o controle e gerenciamento operacional de pressão é a melhor opção (ZYOUD et al., 2016). A seleção dessa opção ocorreu devido às condições da cidade em que foi aplicado o estudo de caso e às vantagens conhecidas dessa estratégia na redução de perdas de água (ZYOUD et al., 2016). Assim, essa metodologia ajudará as prestadoras de serviço de abastecimento de água a identificar planos integrados de gerenciamento de perdas de água que poderão guiar os gestores a conduzirem melhor o controle dessas perdas (ZYOUD et al., 2016).

Hamchaoui et al. (2015) publicou um estudo em que o objetivo foi desenvolver uma ferramenta metodológica para o gerenciamento sustentável do serviço de abastecimento de água potável, levando em consideração as especificidades locais da Argélia. Essa pesquisa deu suporte à empresa pública de abastecimento de água do país que estava enfrentando desafios em relação às direções da política governamental para o gerenciamento sustentável e para transformar essas direções em ações concretas em sua estrutura (HAMCHAOU; BOUDOUKHA; BENZERRA, 2015). Esse processo foi bastante difícil devido principalmente aos aspectos multidimensionais do desenvolvimento sustentável, além da falta de uma metodologia estruturada e de informações de diferentes níveis hierárquicos. A metodologia apresentada no estudo consiste de uma fase de construção, a fim de identificar os principais objetivos e sub-objetivos, bem como critérios e indicadores de sustentabilidade, e de uma fase de avaliação, na qual será avaliada a performance do serviço de abastecimento de água potável da Argélia. A agregação dos indicadores e critérios foi feita a partir dos pesos dados a estes, sendo que esses pesos foram dados pelo AHP. Já a avaliação da performance dos serviços de abastecimento de água potável da Argélia, demonstrou que o sistema possui um bom nível de performance (HAMCHAOU; BOUDOUKHA; BENZERRA, 2015). A ferramenta, ainda, permitiu a

identificação de indicadores a serem melhorados. E, as decisões direcionadas podem melhorar ainda mais o seu desempenho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

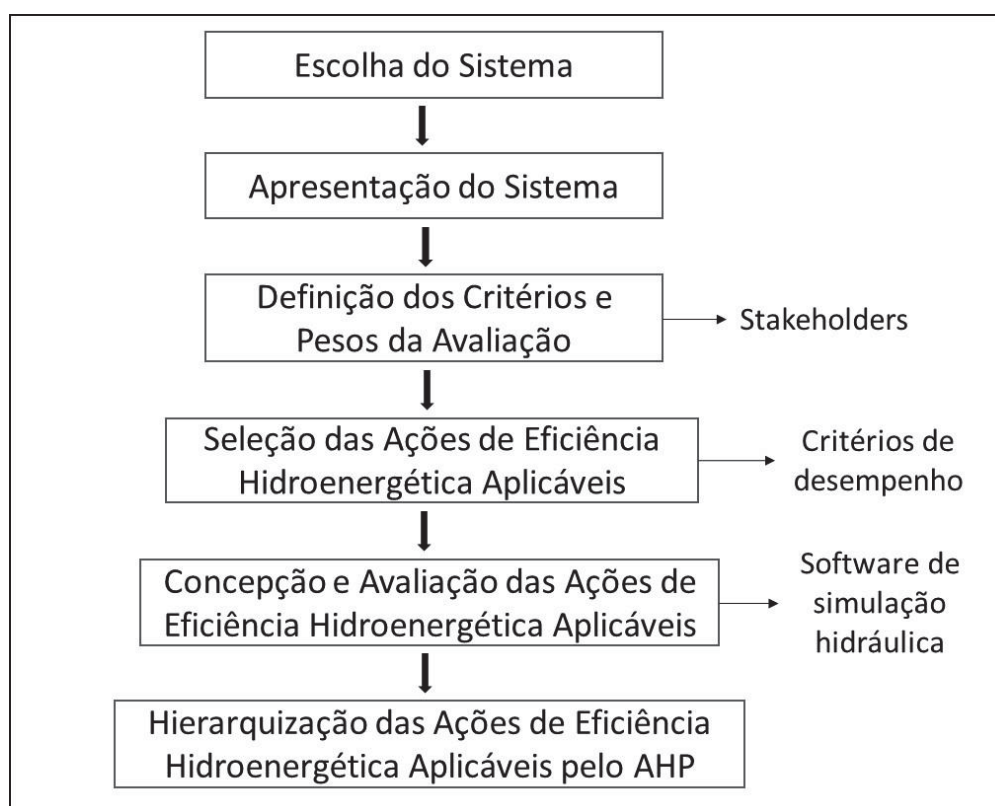
Nesse item é apresentada a metodologia utilizada na tese para desenvolver uma ferramenta que hierarquize ações de eficiência hidroenergética em SAAs.

4.1 ESTRUTURAÇÃO DA FERRAMENTA PARA HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SAA

Nessa primeira etapa a ferramenta para hierarquização das ações de eficiência hidroenergética é estruturada. Essa estrutura foi inspirada no CAMUS, anteriormente apresentado.

Na FIGURA 9, a seguir, é apresentado um fluxograma que ilustra todas as etapas da ferramenta.

FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA ESTRUTURAÇÃO DA FERRAMENTA PARA HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SAAS



FONTE: O autor, 2016.

4.1.1 Escolha do Sistema

Na primeira etapa é necessário escolher qual será o sistema trabalhado. A sugestão nessa etapa é que sejam escolhidos sistemas que estejam operando com algum tipo de deficiência, como, alto índice de perdas de água, consumo de energia alto, problemas de falta de água em determinados períodos de tempo, entre outros, ou, ainda, em sistemas que tenham o objetivo de melhorar a sua eficiência hidroenergética. Enfim, a ideia da ferramenta é tornar os SAA mais eficientes.

4.1.2 Apresentação do Sistema

Após a escolha do sistema, o próximo passo é apresentá-lo. Assim, devem ser apresentadas características como a composição do sistemas; número e tipos de reservatórios; redes de distribuição componentes; vazão captada; vazões produzidas; perdas de água existentes; consumos “per capita”; material, comprimento e idade das adutoras que compõem o sistema; entre outros. Nessa etapa, portanto, o sistema deve ser estudado e devem ser conhecidas as suas características mais relevantes.

4.1.3 Definição dos Critérios e Pesos da Avaliação

Na etapa seguinte, são definidos os critérios pelos quais as ações de eficiência hidroenergética posteriormente selecionadas serão avaliadas. É possível a seleção de critérios financeiros, sociais e ambientais, portanto, podem ser escolhidos os mais diversos critérios, como custo, consumo de energia, cobertura populacional, vazão de captação, entre outros, tornando, assim, a avaliação das ações mais completa.

Após a seleção dos critérios, deve ser feita uma consulta aos *stakeholders* do sistema a fim de que estes julguem par a par os critérios selecionados. Os critérios devem ser julgados par a par, ou seja, dois critérios são diretamente comparados entre si no intuito de valorar cada um deles. Existem duas maneiras de se fazer esse julgamento: voto em consenso ou julgamentos individuais (SAATY, 1989). Para o voto em consenso é necessário que o grupo chegue a um acordo para cada um dos julgamentos par a par. Porém, quando não há possibilidade dos *stakeholders* se reunirem, cada um destes pode julgar individualmente as comparações par a par por

meio de questionários. E, após isso, é feita a média geométrica dos julgamentos individuais a fim de se obter o julgamento do grupo para cada comparação. Como mostrado por Aczel e Saaty (1983), a média geométrica é a única regra apropriada para a combinação de julgamentos no AHP porque preserva a propriedade recíproca nas matrizes combinadas de comparação par a par.

4.1.4 Seleção das Ações de Eficiência Hidroenergética Aplicáveis

Tendo sido definidos os critérios e seus respectivos pesos, parte-se para a seleção das ações de eficiência hidroenergética que poderão ser aplicadas no sistema. Nessa etapa é necessário selecionar, dentro de uma grande variedade de ações de eficiência hidroenergética disponíveis na literatura, aquelas que são aplicáveis ao sistema em questão. Para isso, é necessário verificar critérios de desempenho do sistema, como critérios técnicos (idade das adutoras, índices de perdas de água, consumo “per capita” da população atendida, etc.), critérios financeiros (disponibilidade financeira para a execução das ações de eficiência hidroenergética, etc.), critérios ambientais (vazões de outorga, etc.) e critérios sociais (saúde da população abastecida, etc.).

Com a verificação desses critérios é possível notar se existe algum tipo de fragilidade no sistema, como idade avançada das adutoras que, conseqüentemente, pode causar uma diminuição na vazão transportada; ou alto de índice de consumo “per capita” de água da população quando comparado com os índices médios de consumo “per capita” estaduais e nacional; ou, ainda, alto índice de perdas de água nas redes de distribuição de água componentes quando comparado aos índices de perdas de água estaduais e nacional; entre outros. Quando houver alguma fragilidade apresentada pela verificação dos critérios de desempenho sabe-se que deve-se implantar alguma ação de eficiência hidroenergética para que essa fragilidade possa ser corrigida. Caso a fragilidade apresentada, por exemplo, seja a idade avançada das adutoras e a conseqüente diminuição da vazão transportada por essas, deve-se buscar ações que corrijam isso, como a substituição de todas as adutoras componentes do sistema ou a limpeza das adutoras do sistema. Para a definição de qual dessas duas ações deve ser implantada é necessário verificar a disponibilidade financeira para a execução das ações de eficiência hidroenergética e compatibilizar as necessidades de melhoria de desempenho do sistema à essa disponibilidade.

Essas verificações devem ser feitas para um dos critérios de desempenho avaliados no sistema.

4.1.5 Concepção e Avaliação das Ações de Eficiência Hidroenergética Aplicáveis

Após a seleção das ações de eficiência hidroenergética aplicáveis, o próximo passo é fazer a concepção do sistema de abastecimento de água escolhido em algum *software* de simulação hidráulica.

Deve-se determinar qual o período de tempo se deseja trabalhar, por exemplo, ano de maior consumo, mês de maior consumo, dia de maior consumo ou qualquer outro intervalo de tempo que interessar ao estudo. Após essa determinação deve-se verificar a situação real de operação do sistema. Para isso é necessário que se tenha acesso ao maior número de dados possível da situação operacional para o período de tempo determinado. Esses dados podem ser obtidos na maior parte das vezes na própria concessionária que gerencia o SAA em estudo.

Conhecendo a situação operacional para o período de tempo determinado e de posse de todos os dados operacionais, parte-se para a representação desses dados em algum *software* de simulação hidráulica para que seja possível simular as ações de eficiência hidroenergética implantadas no sistema e verificar como esse sistema responde à implantação das ações.

Como em todo modelo, a representação da situação operacional do sistema em algum *software* de simulação hidráulica não retrata fielmente a situação operacional real desse sistema. Sendo necessário, portanto, algum tipo de validação estatística do modelo em relação aos dados reais operacionais. Podem ser usadas diversas ferramentas estatísticas para a validação do modelo, como a correlação de Pearson, o teste de erros, entre outras.

A partir da concepção operacional do sistema no *software* de simulação hidráulica, cada uma das ações de eficiência hidroenergética selecionadas podem ser simuladas nesse *software*. Com essa simulação verifica-se como o sistema responde às ações implantadas no sistema e quais são os resultados da implantação dessas ações em relação aos critérios previamente escolhidos. Assim, é possível comparar os resultados dos critérios das ações simuladas com a situação operacional do sistema inicial, sem a implantação das ações.

4.1.6 Hierarquização das Ações de Eficiência Hidroenergética Aplicáveis pelo AHP

Por último, de posse dos resultados de todas as simulações, deve ser aplicado o AHP. Se houver mais de um setor em análise dentro do SAA estudado, o AHP deve ser aplicado separadamente para cada um dos setores.

Em um primeiro momento, porém, devem ser verificados os resultados das ações simuladas para cada um dos critérios previamente definidos a fim de que seja possível avaliar quais ações obtiveram melhores desempenhos para cada um desses critérios. Esse passo é importante para que sejam determinadas matrizes de julgamentos das ações simuladas para cada um dos critérios definidos. Essas matrizes de julgamentos são determinadas a partir da escala de julgamento de importância criada por Saaty (1980) e apresentada no QUADRO 3.

Para que esse passo seja melhor compreendido é apresentado um exemplo. Supõe-se que o critério selecionado foi a cobertura populacional. E que foram simuladas 3 ações de eficiência hidroenergética no SAA sob estudo e cada uma delas apresentou o seguinte resultado: Ação 1, 70%; Ação 2, 55%; e, Ação 3, 85%. A ação com melhor desempenho para esse critério é aquela que apresenta maior cobertura populacional. Sendo, nesse exemplo, a Ação 3, seguido da Ação 1 e, por último, a Ação 2. Para determinar a matriz de julgamentos dessas ações em relação ao critério cobertura populacional, deve-se julgar par a par o desempenho de cada uma delas em relação critério cobertura populacional de acordo com a escala de julgamentos de importância apresentada no QUADRO 3. Assim, quando se julga o desempenho da Ação 1 (70%) com o desempenho da Ação 2 (55%), é perceptível que a Ação 1 possui melhor desempenho e por isso deve-se escolher dentro do QUADRO 3 qual o julgamento atribuído à Ação 1 em relação à Ação 2, podendo a primeira ser julgada como 3, 5, 7 ou 9 vezes com melhor desempenho do que a segunda. Para definir qual o julgamento atribuído é interessante que se faça uma escala própria para esse critério baseada nas diferenças percentuais de cobertura populacional entre cada uma das ações, pois todas passarão por esse julgamento par a par. Para esse exemplo, sugere-se a escala apresentada na TABELA 2.

TABELA 2 – ESCALA DE JULGAMENTOS DE ACORDO COM A DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES SIMULADAS EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

Escala de julgamentos – Diferença percentual entre os resultados das ações	Julgamento atribuído
0 – 14,9%	1
15 – 29,9%	3
30 – 44,9%	5
45 – 59,9%	7
≥ 60%	9

De acordo com a TABELA 2, portanto, se a diferença percentual entre os resultados das ações for de até 14,9% é atribuído julgamento 1; entre 15% e 29,9%, julgamento 3; entre 30% e 44,9%, julgamento 5; entre 45 e 59,9%, julgamento 7; e, diferenças percentuais iguais ou acima de 60%, julgamento 9. Essa escala foi criada aleatoriamente, podendo ser adaptada de acordo com a percepção do usuário. Com o auxílio da TABELA 2, quando se julga o desempenho da Ação 1 (70%) com o desempenho da Ação 2 (55%), obtém-se uma diferença percentual de 15%, sendo, com isso, a Ação 1 julgada como possuindo um desempenho 3 vezes melhor do que a Ação 2. Esse processo de julgamento par a par é repetido para cada uma das ações e a partir disso é determinada a matriz de julgamentos do critério cobertura populacional. Para esse exemplo a matriz de julgamentos é apresentada na TABELA 3.

TABELA 3 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DETERMINADA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

	Ação 1	Ação 2	Ação 3
Ação 1	1	3	1/3
Ação 2	1/3	1	1/5
Ação 3	3	5	1

Esse processo de determinação da matriz de julgamentos a partir dos resultados das ações deve ser feito para cada um dos critérios selecionados no estudo. Além disso, deve-se verificar a consistência de todas as matrizes de julgamentos determinadas.

Após a determinação das matrizes de julgamentos para cada um dos critérios selecionados parte-se para a implementação do AHP. Tendo ao fim dessa etapa a hierarquização das ações de eficiência hidroenergética para o SAA em estudo.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 ESCOLHA DO SISTEMA

Para a realização do estudo de caso foi escolhido o sistema ABCD, que fica localizado nos municípios de Curitiba/PR e Pinhais/PR, administrado pela empresa prestadora de serviços de saneamento do estado do Paraná. Esse sistema foi escolhido pela disponibilidade de dados e também por possuir várias configurações em único sistema, como reservatório apoiado, reservatório elevado e *booster*, além de possuir altos índices de perdas de água em algumas redes de distribuição de água componentes.

5.2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema ABCD tem início na bacia hidrográfica X, onde a prestadora de serviços de saneamento do estado construiu três barragens para regularização da vazão. A barragem do Rio A tem capacidade de armazenamento de 58 hm³. E, no Rio E estão as outras duas, sendo a primeira denominada E1, com capacidade de 22,5 hm³ e a E2 II, com capacidade de 20,5 hm³ (SANEPAR, 2013).

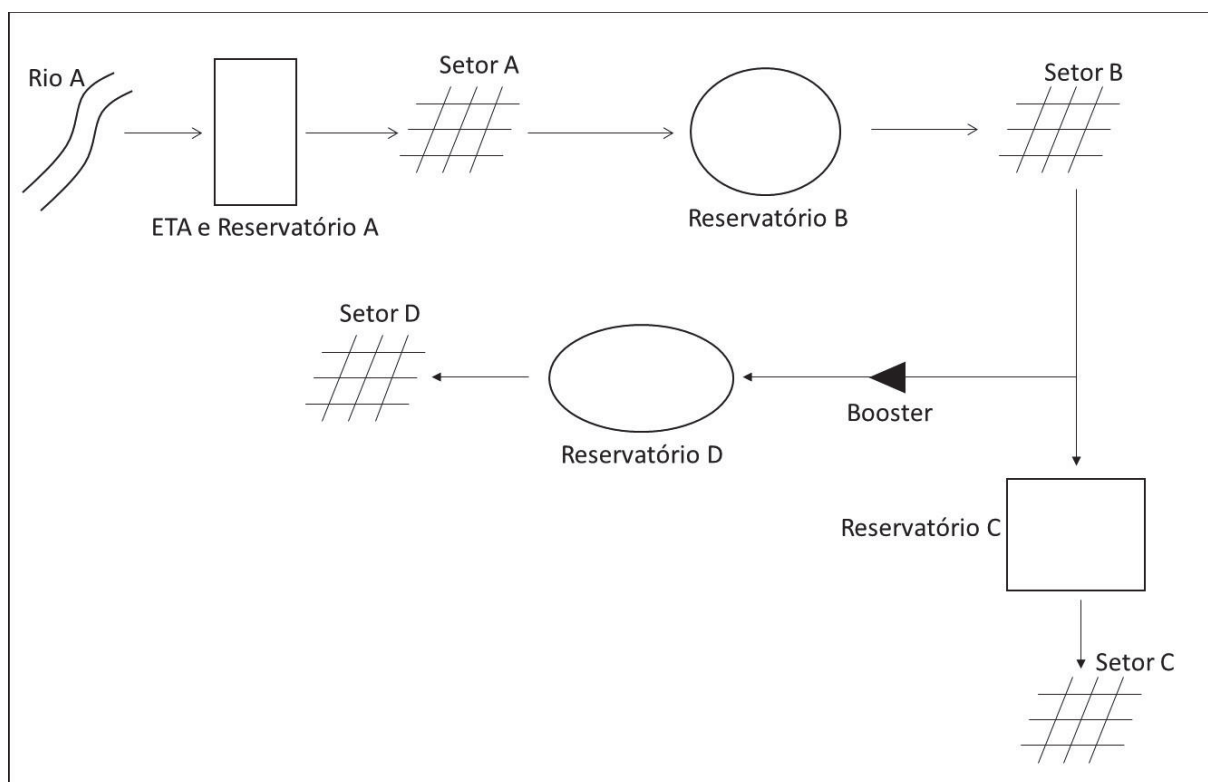
Essas três barragens contribuem para regularizar a vazão do Rio A que recebe, ainda, a contribuição das bacias incrementais dos rios F, G e à jusante, do H (SANEPAR, 2013). Esses mananciais abastecem as ETAs A e J.

No Sistema A, a água é vertida por um canal em cuja extremidade de jusante estão instaladas a Estação Elevatória de Água Bruta e Estação de Tratamento de Água. O processo de tratamento é do tipo completo com floculação, flotação, filtração, fluoretação e desinfecção. A capacidade de produção atual varia entre 2.900 a 3.000 L/s (SANEPAR, 2013).

Após o tratamento, a água é encaminhada aos centros de reservação B, Y, Z e W (SANEPAR, 2013).

Nesse estudo de caso será dada atenção somente ao Sistema ABCD. Na FIGURA 10 é apresentado um diagrama esquemático do sistema.

FIGURA 10 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA ABCD



FONTE: O autor, 2018.

O sistema tem início com a captação de água no Rio A e a entrada desta na ETA e Reservatório A. A partir desta, a água é distribuída para vários centros de reservação. No sistema em estudo, a água é recalçada por um sistema elevatório composto de 3 conjuntos motobombas (2 em funcionamento e 1 de reserva), que atuam em paralelo, com inversor de frequência. O sistema elevatório recalca a água e faz sua distribuição em marcha na rede de distribuição do Setor A, o qual possui um reservatório de ponta situado no bairro B denominado Reservatório B. Depois que a água sai do Reservatório B, ela é recalçada novamente, por 3 conjuntos motobombas (2 em funcionamento e 1 de reserva) em paralelo sem inversor de frequência, e distribuída em marcha para o setor B. Após a distribuição no setor, uma parte da água segue para o Reservatório C, sendo distribuída por gravidade para o Setor C. Outra parte segue para o *booster* até o Reservatório D e, por fim, é distribuída por gravidade para o Setor D.

O primeiro sistema elevatório, entre a ETA e Reservatório A e o Setor A, é composto por 3 conjuntos motobombas em paralelo, cujas características estão descritas na TABELA 4.

TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELEVATÓRIO ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E SETOR A

Marca	KSB
Modelo	RDL 150-310A
Altura manométrica (m)	36
Vazão (l/s)	55,4
Motor elétrico	WEG
Potência (CV)	40
Tensão (V)	440
Rotação (rpm)	1770
Quantidade	3 conjuntos
Acionamento	Com inversor de frequência

FONTE: SANEPAR, 2014.

Já, as características do segundo sistema elevatório, também composto por 3 conjuntos motobombas em paralelo e que está localizado entre o Reservatório B e o setor B, são apresentadas na TABELA 5, conforme segue.

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELEVATÓRIO ENTRE RESERVATÓRIO B E SETOR B

Marca	EBARA	HAUPT
Modelo	BHS-813	P84
Número de estágios	3	2
Altura manométrica (m)	53	53
Vazão (l/s)	32	32
Potência (CV)	35	35
Rotação (rpm)	3500	3500
Quantidade	2 conjuntos	1 conjunto
Acionamento	Sem inversor de frequência	Sem inversor de frequência

FONTE: SANEPAR, 2014.

Já o *booster* que eleva a água até o Reservatório D, apresenta as características mostradas na TABELA 6.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DO BOOSTER

Marca	KSB
Modelo	MEGABLOCK 32-160
Rotor (mm)	176
Altura manométrica (mca)	44
Vazão (l/s)	8,6
Potência (CV)	10
Rotação (rpm)	3500
Quantidade	2 conjuntos (sendo 1 de reserva)
Acionamento	Sem inversor de frequência

FONTE: SANEPAR, 2014.

Para melhor compreensão do sistema é importante conhecer as cotas em que se encontram os reservatórios e os volumes destes, que estão apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 – COTAS E VOLUMES DO RESERVATÓRIO DO SISTEMA

	Volume (m³)	Cota do nível de água máximo (m)	Cota do nível de água mínimo (m)
Reservatório A	15.000	879,9	874,5
Reservatório B	2.000	905	901,1
Reservatório C	300	930,15	927,1
Reservatório D	200	961,5	956,9

FONTE: SANEPAR, 2013.

Nota-se que o Reservatório A está localizado nas cotas mais baixas de todo o sistema, enquanto os outros reservatórios estão localizados em cotas mais altas gradativamente, chegando ao fim do sistema com o Reservatório D localizado nas cotas mais altas de todo o sistema.

Ainda com relação às cotas do sistema, o *booster* se localiza na cota 921,8 m.

Na TABELA 8 são apresentadas informações a respeito do volume micromedido, volume produzido e perdas de água do Sistema ABCD no ano de 2016. As perdas de água apresentadas referem-se às perdas totais, isto é, à soma das perdas reais (físicas) e das perdas aparentes. Esses dados foram disponibilizados pela prestadora de serviços de saneamento do Paraná no ano de 2017, no mês de Abril, referentes ao período de Janeiro a Dezembro de 2016.

TABELA 8 – PANORAMA DO SISTEMA ABCD NO ANO DE 2016

Unidade	Volume micromedido (m³/ano)	Volume produzido (m³/ano)	Média anual de perda de água (%)
Setor D	135.357	149.369	9,38
Setor C	121.579	132.136	7,99
Setor B	379.310	767.640	50,59
Setor A	989.918	1.567.431	36,84

FONTE: Dados disponibilizados pela SANEPAR, 2017.

Observa-se que com relação ao volume produzido e micromedido, o Setor A é o setor que mais produz e, conseqüentemente, também possui o maior volume micromedido, seguido do Setor B e, por fim, dos setores C e D. Já com relação às

perdas de água, o setor C é o que possui menor índice de perdas, 7,99%; seguido do Setor D, com 9,38%; na sequência aparece o Setor A, com 36,84%; e, com maior índice de perdas de água, o Setor B (50,59%). Os Setores C e D apresentam índices de perdas de água bem menores do que os demais sistemas, pois utilizam hidrômetros ultrassônicos que possuem maior resolução.

Na TABELA 9 são apresentados também os quatro setores de distribuição que compõem o sistema em estudo com relação ao número de economias atendidas, à população abastecida e ao consumo “per capita” atendido em cada setor.

TABELA 9 – SITUAÇÃO DOS SETORES DE DISTRIBUIÇÃO COMPONENTES DO SISTEMA ABCD NO ANO DE 2016

Setor	Número de economias atendidas	População atendida (hab.)	Consumo per capita médio da população (L/hab.d)
A	8.298	26.554	104,8
B	3.378	10.810	100,7
C	350	1.120	282,7
D	520	1.664	226,8

FONTE: SANEPAR, 2013.

O setor A é o que abastece o maior número de pessoas, seguido dos setores B, D e C. Já com relação ao consumo médio “per capita” em cada setor, destacam-se os altos consumos médios per capita dos Setores C, com 282,7 L/hab.d, seguido do Setor D, com 226,8 L/hab.d e, opostamente a esses, os setores A e B apresentam consumos médios “per capita” mais baixos, 104,8 L/hab.d e 100,7 L/hab.d, respectivamente. Para melhor entendimento é importante verificar o consumo médio “per capita” do Brasil que, em 2015, foi de 154 L/hab.d (SNIS, 2016). Todos esses dados podem parcialmente explicar a diferença de nível social que existe entre os diferentes setores, sendo os setores C e D de um alto nível social enquanto os setores A e B de médio a baixo nível social.

Na TABELA 10 são descritas as adutoras componentes do sistema, e são apresentados os diâmetros, materiais e ano de instalação.

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DAS ADUTORA DO SISTEMA ABCD

	Material	Diâmetro (mm)	Ano de Instalação
Adutora entre ETA e Reservatório A e Reservatório B	Ferro fundido dúctil	400	2003
	PVC Defoyo	300	2000
Adutora entre Reservatório B e Tê de bifurcação	PVC Defoyo	200	2000
Adutora entre Tê de bifurcação e Reservatório C	PVC Defoyo	150	2000
Adutora entre Tê de bifurcação e <i>booster</i>	PVC Defoyo	150	2000
Adutora entre <i>booster</i> e Reservatório D	PVC Defoyo	150	2000

FONTE: SANEPAR, 2013.

Apenas uma parte da adutora que liga a ETA e Reservatório A ao Reservatório B é de ferro fundido dúctil, enquanto todas as outras adutoras que compõem o sistema são de PVC Defoyo. Já com relação aos diâmetros, as adutoras que ligam a ETA e Reservatório A ao Reservatório B são as maiores com 400 mm e 300 mm de diâmetro. Em seguida aparece a adutora entre o Reservatório B e o Tê de bifurcação com 200 mm. E, por último, as adutoras que ligam o Tê de bifurcação ao Reservatório C e que ligam o Tê de bifurcação ao *booster* e, posteriormente, ao Reservatório D que possuem diâmetro de 150 mm. Além disso, com exceção da adutora entre a ETA e Reservatório A e o Reservatório B que foi instalada em 2003, todas as outras que compõem o sistema foram instaladas no ano 2000.

5.3 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E PESOS DE AVALIAÇÃO

Conforme apresentado na FIGURA 9, o terceiro passo da ferramenta foi a definição dos critérios e definição dos pesos que foram dados a esses critérios para posterior avaliação das ações de eficiência hidroenergética.

No estudo de caso foram escolhidos os seguintes critérios: cobertura populacional, vazão captada, consumo de energia e custo de implantação.

Todos os critérios possuem seus resultados em percentuais comparados à situação atual do sistema sem a implantação de nenhuma ação de eficiência hidroenergética. A única exceção trata-se do critério custo de implantação que possui resultado em quantidade de reais gastos por quilômetro de tubulação (R\$/km) detectada e reparada ou substituída para implantação de cada ação.

Esses critérios foram escolhidos com o objetivo de avaliar as dimensões ambiental (consumo de energia e vazão captada), social (cobertura populacional) e financeira (custo de implantação). Sendo feita, com isso, uma avaliação mais abrangente e completa, avaliando aspectos nas diversas dimensões.

Para a definição dos pesos dos critérios foi utilizado um questionário (Apêndice I) por meio do qual os *stakeholders* envolvidos julgaram par a par os critérios selecionados. Foram entrevistados profissionais da área de saneamento que trabalham na prestadora de serviços de saneamento estadual, na agência de águas estadual, no instituto ambiental estadual, nas secretarias do meio ambiente municipal e estadual e na fundação nacional da saúde. Igualmente, foram entrevistados profissionais de empresas privadas, professores e estudantes representando o setor acadêmico, além da comunidade em geral. Selecionaram-se, portanto, entrevistados dos mais diversos órgãos públicos e empresas e também da comunidade a fim de simular a composição de um comitê de bacia hidrográfica, o qual é composto por entidades do poder público, usuários dos recursos hídricos e sociedade civil. Sendo que nesses comitês são debatidos temas relevantes à bacia hidrográfica em questão e aprovados por consenso entre todos os componentes do comitê medidas a serem tomadas. Foi simulado, com isso, que a escolha das medidas de eficiência hidroenergética passaria por um comitê de bacia hidrográfica, e o questionário foi elaborado com o intuito de verificar qual a prioridade dada aos critérios selecionados pelos entrevistados.

Com isso, foram entrevistados profissionais de cada um dos órgãos citados, empresas privadas, comunidade acadêmica e comunidade em geral. A quantidade de entrevistados de cada grupo de *stakeholders* é mostrada na TABELA 11.

TABELA 11 – QUANTIDADE DE ENTREVISTADOS EM CADA GRUPO DE *STAKEHOLDERS*

<i>Stakeholder</i>	Nº de entrevistados
Setor acadêmico	25
Fundação nacional da saúde	1
Empresas privadas	7
Comunidade em geral	13
Instituto ambiental estadual	7
Prestadora de serviços de saneamento municipal	12
Secretaria estadual do meio ambiente	1
Secretaria municipal do meio ambiente	2

No total, portanto, foram entrevistadas 68 pessoas. Após a entrevista, foi feita uma composição entre os questionários respondidos em cada um dos grupos de *stakeholders* utilizando a média geométrica dos julgamentos dos critérios par a par, como recomendado por Aczel e Saaty (1983). De posse dos julgamentos par a par dos critérios pelos *stakeholders* foi, então, executado o AHP, a fim de verificar qual a prioridade dada aos critérios julgados.

A fim de exemplificar essa etapa, é apresentado a seguir o passo a passo de como foi feita a média geométrica dos julgamentos par a par do grupo de *stakeholders* Secretaria municipal do meio ambiente, que contou com 2 questionários respondidos. Os dois entrevistados julgaram par a par cada um dos critérios selecionados de acordo com o questionário apresentado no Apêndice 1 e após esse julgamento foi possível montar a matriz de julgamento para cada um dos questionários respondidos. As matrizes de cada um dos questionários são apresentadas na TABELA 12.

TABELA 12 – MATRIZES 1 E 2 DE JULGAMENTOS MONTADAS A PARTIR DOS QUESTIONÁRIOS RESPONDIDOS PELOS DOIS ENTREVISTADOS QUE TRABALHAM NA SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE MUNICIPAL

MATRIZ 1

	Cobertura populacional	Vazão captada	Consumo de energia	Custo de implantação
Cobertura Populacional	1	1	1/7	1/7
Vazão captada	1	1	1	1/7
Consumo de energia	7	1	1	1
Custo de implantação	7	7	1	1

MATRIZ 2

	Cobertura populacional	Vazão captada	Consumo de energia	Custo de implantação
Cobertura Populacional	1	1/5	1	1/3
Vazão captada	5	1	3	1/5
Consumo de energia	1	1/3	1	1/5
Custo de implantação	3	5	5	1

As matrizes de julgamentos da TABELA 12 apresentam como os entrevistados julgaram par a par cada um dos critérios selecionados a partir do questionário. Por exemplo, na matriz 1 o entrevistado considerou o consumo de energia 7 vezes mais importante do que a cobertura populacional, já, na matriz 2 o

entrevistado considerou os critérios consumo de energia e cobertura populacional com mesma importância, tendo sido atribuído o número 1 ao julgamento de acordo com o QUADRO 3. Após a montagem dessas matrizes foi feita a média geométrica de cada uma das células das duas matrizes a fim de se obter uma matriz de julgamento global para a Secretaria do meio ambiente municipal que leve em consideração a opinião dos dois entrevistados. Foi feita, portanto, as médias geométricas das células a_{11} , a_{12} , ... , a_{44} das duas matrizes apresentadas gerando uma nova matriz de julgamento com os resultados dessas médias geométricas. A nova matriz é apresentada na TABELA 13.

TABELA 13 – MATRIZ GLOBAL DE JULGAMENTO DA SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE MUNICIPAL APÓS A REALIZAÇÃO DA MÉDIA GEOMÉTRICA DAS CÉLULAS DAS MATRIZES APRESENTADAS NA TABELA 12

	Cobertura populacional	Vazão captada	Consumo de energia	Custo de implantação
Cobertura Populacional	1	0,45	0,38	0,22
Vazão captada	2,24	1	1,73	0,17
Consumo de energia	2,65	0,58	1	0,45
Custo de implantação	4,58	5,92	2,24	1

Após isso, foi realizada a análise de consistência da matriz apresentada na TABELA 13 e obteve-se uma razão de consistência de 9,84%. Essa razão de consistência foi considerada aceitável, pois ficou abaixo de 10%, de acordo com recomendação de Saaty (1980). Assim, seguindo todos os passos da execução do AHP é obtido o vetor prioridade para esse *stakeholder*, apresentado na TABELA 14.

TABELA 14 - VETOR PRIORIDADE DA SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE MUNICIPAL OBTIDO APÓS A EXECUÇÃO DO AHP

Critério	Vetor prioridade
Custo de implantação	54%
Consumo de energia	19%
Vazão captada	19%
Cobertura populacional	9%

Ao fim, portanto, são obtidos os pesos dados aos critérios selecionados pelos entrevistados que atuam na Secretaria do meio ambiente municipal. Sendo que para esse *stakeholder* o critério custo de implantação é o de maior prioridade, com um peso de 54%.

Para cada grupo de *stakeholders* foi feito esse passo a passo apresentado. Primeiramente foram montadas as matrizes de julgamentos para cada entrevistado, após isso foi feita a média geométrica dessas matrizes a fim de se obter a matriz de julgamento global por grupo de *stakeholders*, após a obtenção da matriz de julgamento global é feita uma análise de consistência dessa matriz e, por último, é executado o AHP para que sejam obtidos os vetores prioridades para cada grupo de *stakeholders*.

A seguir, na TABELA 15, são apresentados os vetores prioridade dos critérios para cada um dos *stakeholders* entrevistados.

TABELA 15 – RESULTADOS DOS VETORES PRIORIDADE DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS PARA CADA UM DOS *STAKEHOLDERS* ENTREVISTADOS

	Prestadora de serviços de saneamento municipal	Instituto de águas estadual	Instituto ambiental estadual	Secretaria do meio ambiente municipal
Cobertura populacional	40%	49%	27%	9%
Vazão captada	28%	32%	37%	19%
Consumo de energia	19%	8%	23%	19%
Custo de implantação	13%	11%	14%	54%

	Secretaria do meio ambiente estadual	Fundação nacional de saúde	Empresas privadas	Setor acadêmico	Comunidade em geral
Cobertura populacional	6%	32%	43%	41%	29%
Vazão captada	18%	54%	18%	23%	33%
Consumo de energia	25%	5%	28%	21%	23%
Custo de implantação	51%	9%	11%	15%	15%

Os valores apresentados na TABELA 15 representam os pesos dados a cada um dos critérios selecionados para cada um dos grupos de *stakeholders* entrevistados. Assim, por exemplo, para o instituto ambiental estadual o critério cobertura populacional tem um peso de 27% no momento da escolha da ação de eficiência hidroenergética a ser executada.

Observa-se, portanto, que para a prestadora de serviços de saneamento municipal a cobertura populacional é o critério que possui maior peso na determinação

da ação de eficiência hidroenergética a ser executada no sistema, com 40%. Em seguida aparecem os critérios vazão captada (28%), consumo de energia (19%) e custo de implantação (12%).

Além da prestadora de serviços de saneamento municipal, o instituto das águas estadual, as empresas privadas e o setor acadêmico também dão maior prioridade ao critério cobertura populacional, com pesos de 49%, 43% e 41%, respectivamente. Sendo que desses *stakeholders* citados, apenas as empresas privadas não colocam o critério vazão captada como o segundo mais importante. Para o instituto das águas estadual, a vazão captada fica em segundo lugar possuindo um peso de 32% e para o setor acadêmico, 23%. Já as empresas privadas, colocam como segundo critério o consumo de energia, com 28%, e, somente após este é que aparece a vazão captada (18%) e, por último, o critério custo de implantação (11%). Em contrapartida, o instituto das águas estadual coloca como menos prioritários, em ordem decrescente, os critérios custo de implantação (11%) e consumo de energia (8%). Por fim, para o setor acadêmico os critérios consumo de energia (23%) e custo de implantação (15%) surgem como menos importantes dentre os quatro critérios avaliados.

Para o instituto ambiental estadual, a fundação nacional de saúde e a comunidade em geral o critério mais importante a ser considerado no momento da escolha da ação de eficiência hidroenergética a ser implantada no sistema é a vazão captada, com pesos de 37%, 54% e 33%, respectivamente. Para ambos também, em seguida é apontado o critério cobertura populacional como segundo mais prioritário, tendo tido as pontuações de 27%, 32% e 29%, respectivamente. Nas últimas colocações aparecem para os três *stakeholders* os critérios consumo de energia e custo de implantação. Sendo que, para o instituto ambiental estadual e a comunidade em geral é considerado, em ordem decrescente, o critério consumo de energia (em ambos os *stakeholders* com peso de 23%) e após o critério custo de implantação (com 14% e 15%, respectivamente). Já a fundação nacional de saúde, considera o terceiro critério mais importante como sendo o custo de implantação (9%) e, por último, aparece o consumo de energia, com peso de 5%.

Por fim, as secretarias do meio ambiente municipal e estadual apontam como critério de maior prioridade o custo de implantação, com pesos de 54% e 51%, respectivamente. Na sequência, para a secretaria do meio ambiente municipal aparecem empatados o consumo de energia e a vazão captada, com 19%, e, por

último, a cobertura populacional (9%). Já a para a secretaria do meio ambiente estadual, são apontados, na sequência, consumo de energia (25%), vazão captada (18%) e cobertura populacional (6%).

Conhecidas, portanto, as prioridades de cada um dos *stakeholders* envolvidos, o próximo passo foi agrupar essas prioridades em uma única matriz, que represente a opinião do grupo como um todo. Para isso, novamente de acordo com Aczel e Saaty (1983), as prioridades individuais de cada um dos *stakeholders* foram agregadas em uma única matriz por meio da média geométrica. Obteve-se, assim, a hierarquização dos critérios avaliados pelo grupo na TABELA 16.

TABELA 16 – HIERARQUIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS AVALIADOS PELO GRUPO DE *STAKEHOLDERS*

Ordem de Hierarquia	Critério	Pesos
1°	Vazão captada	31%
2°	Cobertura populacional	30%
3°	Custo de implantação	20%
4°	Consumo de energia	19%

De acordo com TABELA 16, percebe-se que os critérios vazão captada e cobertura populacional obtiveram pesos muito próximos, com uma ligeira vantagem para a vazão captada, que obteve um percentual de 31%, enquanto a cobertura populacional ficou com 30%. Em relação aos terceiro e quarto critérios, estes também tiveram pontuações muito próximas, sendo que o custo de implantação recebeu peso de 20% e o consumo de energia ficou com 19%. Conclui-se, portanto, que o grupo de *stakeholders* entrevistados considera, no momento da escolha de qual ação de eficiência energética implantar no sistema em questão, mais importantes os critérios vazão captada e cobertura populacional e, somente após avaliar esses dois critérios, irá considerar os critério custo de implantação e consumo de energia. Sendo o consumo de energia, o critério menos importante dentre os quatro analisados.

Conhecendo-se, então, a visão dos *stakeholders* envolvidos pode-se avaliar as ações de eficiência hidroenergética que serão selecionadas no próximo item a fim de eleger quais ações trarão melhores resultados para o sistema em questão.

5.4 SELEÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA

A fim de selecionar as ações de eficiência hidroenergética para o sistema em estudo foram verificados os critérios de desempenho deste.

Com relação aos critérios técnicos, foi observada na TABELA 10 e verificou-se a idade das adutoras constatando-se, sendo que todas têm entre 15 a 18 anos de idade, assim, tendo possivelmente reduzidos os seus coeficientes de rugosidade e, conseqüentemente, as vazões transportadas por elas. Com isso, selecionou-se a ação de substituição das adutoras antigas por novas adutoras, pois as novas possuirão maiores coeficientes de rugosidade e, conseqüentemente, serão capazes de transportar maiores vazões.

Observou-se também na TABELA 9 os consumos “per capita” de água das populações das várias redes de distribuição que compõem o sistema e notou-se que o setores C e D possuem consumos “per capita” de 282,7 L/hab.dia e 226,8 L/hab.dia, respectivamente. De acordo com o SNIS (2018), o consumo “per capita” médio no estado do Paraná em 2016 foi de 137,81 L/hab.dia e no Brasil foi de 154,14 L/hab.dia, evidenciando que os consumos apresentados nos setores citados estão muito acima das médias estadual e nacional. Nesses setores, portanto, a ação de uso racional da água foi selecionada a fim de sensibilizar a população a reduzir seu consumo.

Com a TABELA 8, percebeu-se que os índices de perda de água nos setores A e B são 36,84% e 50,59%, respectivamente. Levando-se em consideração que o índice médio de perdas de água para o estado do Paraná em 2016 foi de 34,73% e para o Brasil foi de 38,1%, percebe-se que os índices de perdas de água em ambos os setores podem ser reduzidos a fim de que fiquem abaixo das médias apresentadas (SNIS, 2018). Nesses setores, então, a ação de detecção e correção de vazamentos foi selecionada.

Já, em relação aos critérios financeiros, por se tratar de um estudo de caso, não foi utilizada nenhuma restrição quanto ao investimento feito na aplicação das ações.

A respeito dos critérios ambientais também não houve nenhuma restrição. A vazão de outorga para o Conjunto de Bacias sob estudo é de 7.000 L/s. Essa vazão de outorga está dividida entre os rios A, L e K. Atualmente, a captação nesse conjunto de bacias está abaixo da vazão de outorga, não se tornando um aspecto restritivo para a seleção das ações de eficiência hidroenergética. A captação atual nesses rios

é de 3.200 L/s no Rio L, 2.900 L/s no Rio A e 200 L/s no Rio K, totalizando uma captação de 6.300 L/s. Caracterizando, com isso, que o sistema ainda não está operando no seu limite. Fica claro nesse aspecto que qualquer ação de eficiência hidroenergética que venha a ultrapassar a vazão de outorga se tornará inviável.

Ainda, a respeito dos critérios sociais, não há nenhum fator restritivo, pois admite-se que a população do sistema em estudo está sendo abastecida e com água de boa qualidade.

Para esse estudo de caso, portanto, foram selecionadas três ações de eficiência hidroenergética que foram, posteriormente, simuladas no sistema. No QUADRO 4 é apresentado um resumo das ações selecionadas, a justificativa da escolha dessas ações, em quais setores estas serão aplicadas e quais seus objetivos.

QUADRO 4 – RESUMO DAS AÇÕES SELECIONADAS, SUAS JUSTIFICATIVAS, OS SETORES EM QUE SERÃO APLICADAS E SEUS OBJETIVOS

Ações Selecionadas	Justificativa	Setor de Aplicação	Objetivo
Substituição das antigas adutoras por adutoras novas	Idade das adutoras (entre 15 e 18 anos)	Todo o sistema	Substituir as adutoras existentes no sistema por adutoras novas
Uso racional da água	Altos consumos per capita no setores C (282,7 L/hab.dia) e D (226,8 L/hab.dia)	C e D	Sensibilização da população desses setores a fim de reduzir seus consumos per capita de água
Deteção e correção de vazamentos	Altos índices de perdas de água no setores A (36,84%) e B (50,59%)	A e B	Deteção e correção de vazamentos por meio de um geofone e correção desse vazamento pela substituição da tubulação.

Com o auxílio do QUADRO 4 e como citado anteriormente foram selecionadas três ações de eficiência hidroenergética possíveis de serem executadas no sistema em questão, sendo essas: a substituição de antigas adutoras por adutoras novas, o uso racional da água e a detecção e correção de vazamentos. As justificativas das escolhas dessas três ações já foram anteriormente apresentadas.

Sendo importante ressaltar, portanto, que a ação de substituição das tubulações das adutoras substituirá todas as adutoras antigas componentes do sistema por novas adutoras. E, com essa substituição, possibilitar-se-á o transporte

de vazões maiores. Essa ação será executada em todas as adutoras componentes do sistema em questão.

Já na ação de uso racional da água será feita uma sensibilização para que os consumidores reduzam seus consumos per capita efetivos de água. Essa ação será executada somente nos setores C e D por apresentarem altos índices de consumos per capita de água.

Por fim, a ação de detecção e correção dos vazamentos nas redes de distribuição componentes do sistema contemplará a detecção dos vazamentos por meio de um geofone, instrumento que serve para escutar ruídos na terra utilizando-se da prospecção do próprio eco. Após a detecção do vazamento na tubulação, esta será substituída por uma nova. Corrigindo, com isso, qualquer vazamento que possa ter sido encontrado. Essa ação será aplicada somente nos setores A e B devido aos altos índices de perdas de água apresentados.

5.5 CONCEPÇÃO E AVALIAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA APLICÁVEIS

Nessa seção são apresentados como foram feitas a concepção e a avaliação das ações de eficiência hidroenergética selecionadas. Em um primeiro momento é descrita a situação real operacional do sistema e após é apresentado como foi feita a representação do dia de maior consumo do período analisado no *software* Epanet 2.0 Brasil. Por fim, mostra-se a validação do modelo.

5.5.1 Descrição da situação real operacional

Para conceber e avaliar as ações de eficiência hidroenergética escolhidas foi utilizado o *software* Epanet 2.0 Brasil.

Primeiramente, para verificar a situação do sistema em estudo foi considerado o período de tempo de um ano, de Agosto de 2016 a Julho de 2017. Nesse período foi encontrado o dia de maior consumo, dia 13/12/2016, e todas ações foram executadas para esse dia. O panorama do sistema nesse dia é apresentado na TABELA 17. Esses dados foram disponibilizados pela prestadora de serviços de saneamento municipal em 2017, no mês de Abril, referentes ao período de Agosto de 2016 a Julho de 2017.

TABELA 17 – PANORAMA DO SISTEMA NO DIA 13/12/2016

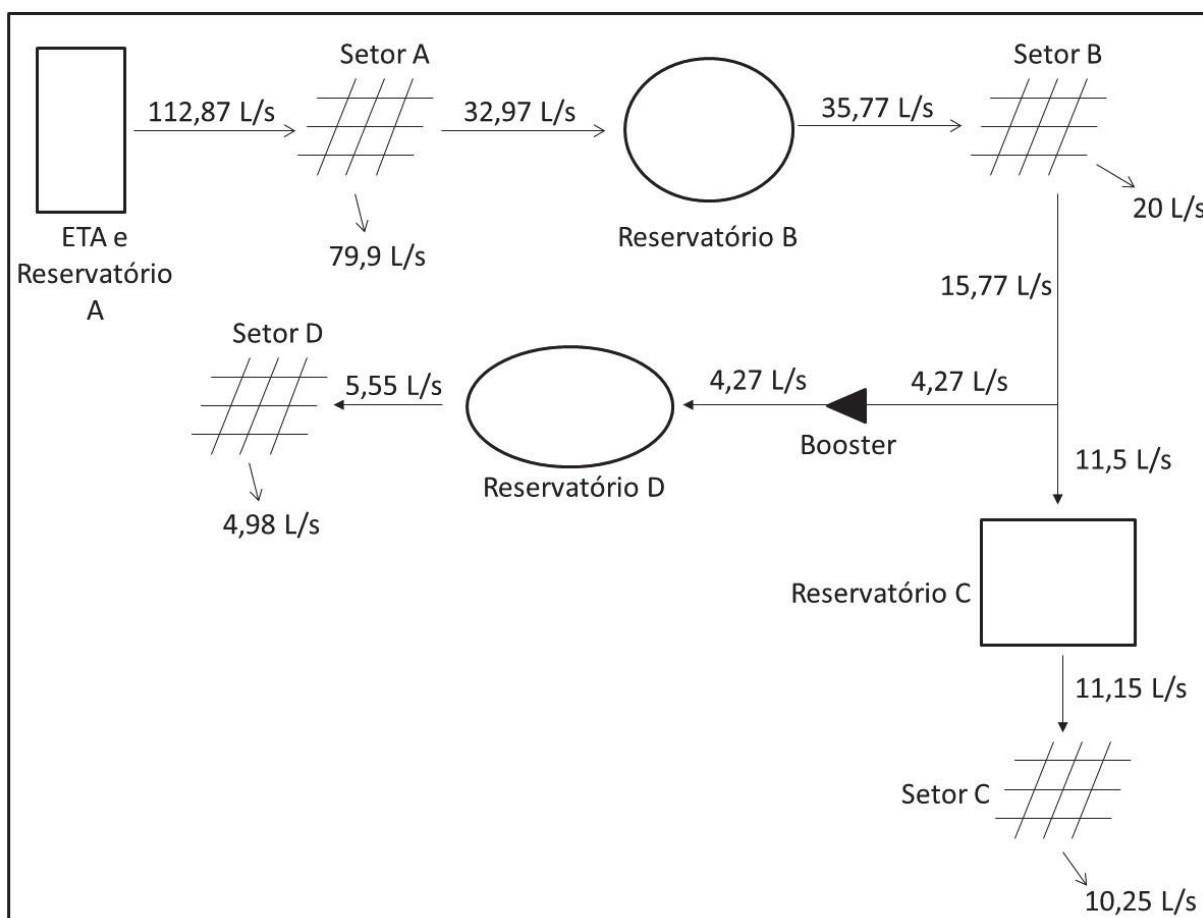
Dados	Valores
Vazão média de saída da ETA e Reservatório A	112,87 L/s
Vazão média consumida no setor A	79,90 L/s
Vazão média de entrada no Reservatório B	32,97 L/s
Vazão média de saída do Reservatório B	35,77 L/s
Vazão média consumida no setor B	20 L/s
Vazão média de entrada no Reservatório C	11,5 L/s
Vazão média de saída do Reservatório C	11,15 L/s
Vazão média de saída do Booster	4,27 L/s
Vazão média de saída do Reservatório D	5,55 L/s
Vazão média consumida no setor C	10,25 L/s
Vazão média consumida no setor D	4,98 L/s

Fonte: Dados disponibilizados pela Sanepar, 2017.

Na

FIGURA 11 é apresentada a representação esquemática do sistema em estudo para o dia de maior consumo.

FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA NO DIA 13/12/2016.



FONTE: O autor, 2017.

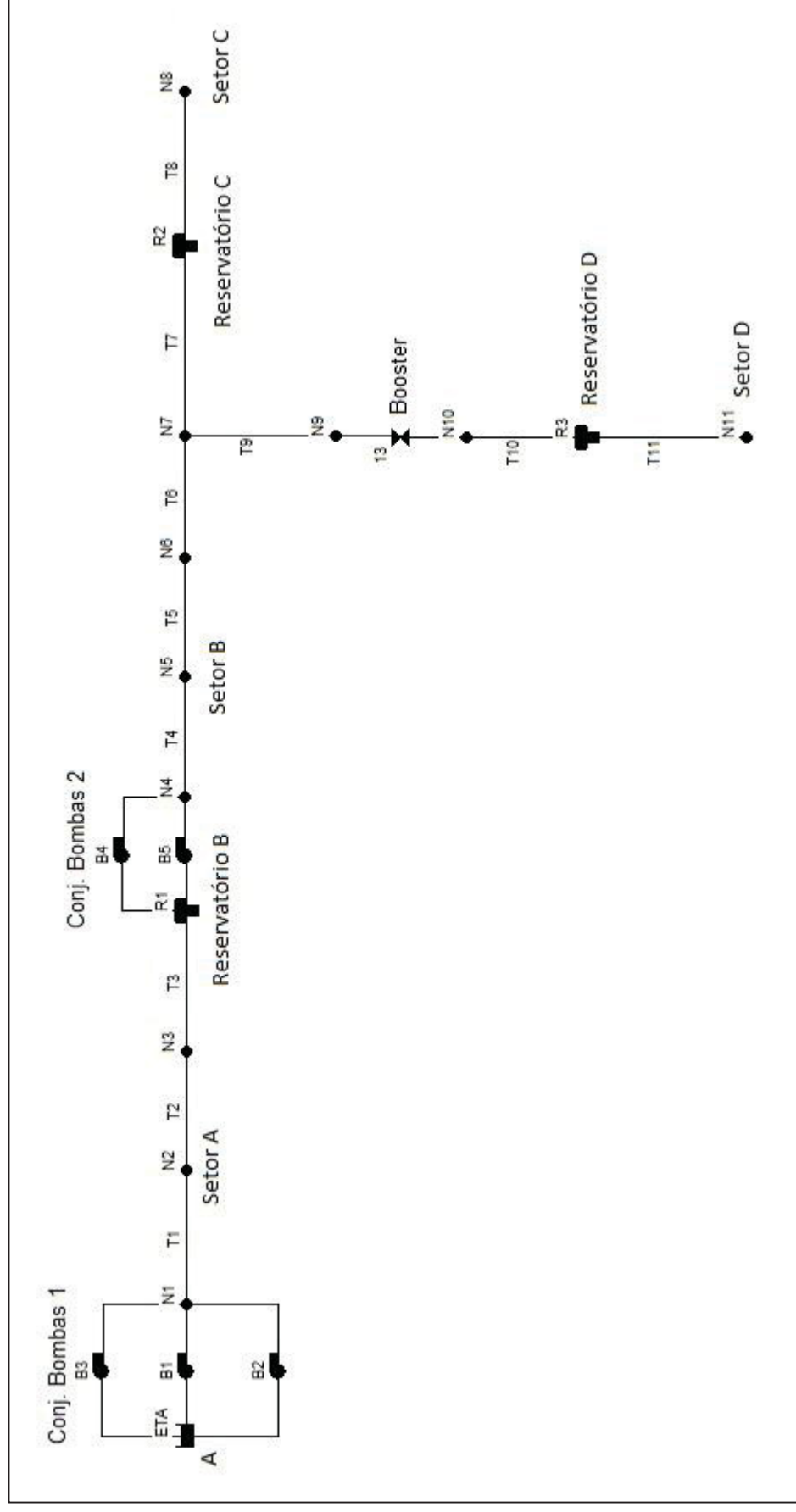
5.5.2 Representação das condições de operação do dia de maior consumo no Epanet

A

FIGURA 11 apresenta a situação real ocorrida no sistema no dia de maior consumo. Porém, quando essas informações são transferidas para o Epanet e após a simulação utilizando as características reais do sistema, houve uma pequena discrepância em relação às vazões reais apresentadas. Isso ocorreu, pois o Epanet realiza uma simulação dos dados reais, transformando-os em um modelo. E, como todo modelo, não retrata a realidade de maneira totalmente fiel.

Na FIGURA 12 a seguir é apresentada a representação do sistema no Epanet.

FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA NO EPANET



Na TABELA 18 são apresentadas todas as variáveis de entrada da ETA e Reservatório A e dos três reservatórios seguintes (B, C e D) no Epanet. Essas informações foram retiradas de cadastros da prestadora de serviços municipal.

TABELA 18 – DADOS DE ENTRADA DA ETA IRAÍ E DOS TRÊS RESERVATÓRIOS NO EPANET

	ETA e Reservatório A	Reservatório B	Reservatório C	Reservatório D
Cota (m)	874,5	901	927	956,9
Altura de água inicial	-	2	1,625	2,3
Altura de água mínima	-	0	0	0
Altura de água máxima	-	4,1	3,15	4,6
Diâmetro	-	50	11,19	7,44

Na TABELA 19 são mostradas as variáveis de entradas para todos os nós numerados apresentados na FIGURA 12.

TABELA 19 – DADOS DE ENTRADA DOS NÓS REPRESENTADOS NO EPANET

	N1	N2 Setor A	N3	N4	N5 Setor B	N6	N7	N8 Setor C	N9	N10	N11 Setor D
Cota (m)	890	890	900	920	920	920	920	910	921,8	921,8	930
Consumo base (l/s)	0	79,9	0	0	20	0	0	11,15	0	0	5,55

Os nós N2 (Setor A), N5 (Setor B), N8 (Setor C) e N11 (Setor D) representam redes de distribuição. Essas redes foram transformadas em pontos de consumo, nos quais, portanto, os consumos são referentes à situação do dia de maior consumo do sistema. Já as informações a respeito das cotas, foram retiradas de cadastros fornecidos pela Sanepar e nos nós que representam as redes de distribuição foi feita uma média das cotas dessas redes.

Na TABELA 20 são apresentadas todas as características dos trechos numerados na FIGURA 12.

TABELA 20 – DADOS DE ENTRADAS DOS TRECHOS REPRESENTADOS NO EPANET

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Comprimento (m)	1446,07	191,83	1787,59	429,14	649,05	3541,59
Diâmetro (mm)	400	450	300	300	150	200
Rugosidade	85	105	105	105	105	105
Coef. perda de carga singular	10	10	10	10	10	10

	T7	T8	T9	T10	T11
Comprimento (m)	394,29	1547,62	1563,29	1796,33	75,94
Diâmetro (mm)	200	150	150	150	150
Rugosidade	105	105	105	105	105
Coef. perda de carga singular	10	10	10	10	10

No trechos apresentados na TABELA 20, informações sobre os comprimentos e diâmetros dos trechos foram fornecidas pelos cadastros disponibilizados pela prestadora de serviços de saneamento municipal. Já para a rugosidade foram consultadas tabelas disponíveis na literatura que indicam os coeficientes de rugosidade para tubos novos e tubos antigos e informações a respeito da idade das tubulações disponíveis na TABELA 10 para, com isso, terem sido definidos os coeficientes de rugosidade para os trechos em questão. Em relação ao coeficiente de perda de carga de singular, utilizou-se um coeficiente médio para todos os trechos.

No Epanet o *booster* é representado como uma Válvula de Perda de Carga Fixa (PBV) orientada no sentido contrário. Com isso, a altura de elevação de dimensionamento é convertida em pressão equivalente e é utilizada como parâmetro de controle da válvula. Na TABELA 21 são apresentadas as variáveis de entrada do *booster*.

TABELA 21 – DADOS DE ENTRADA DO BOOSTER NO EPANET

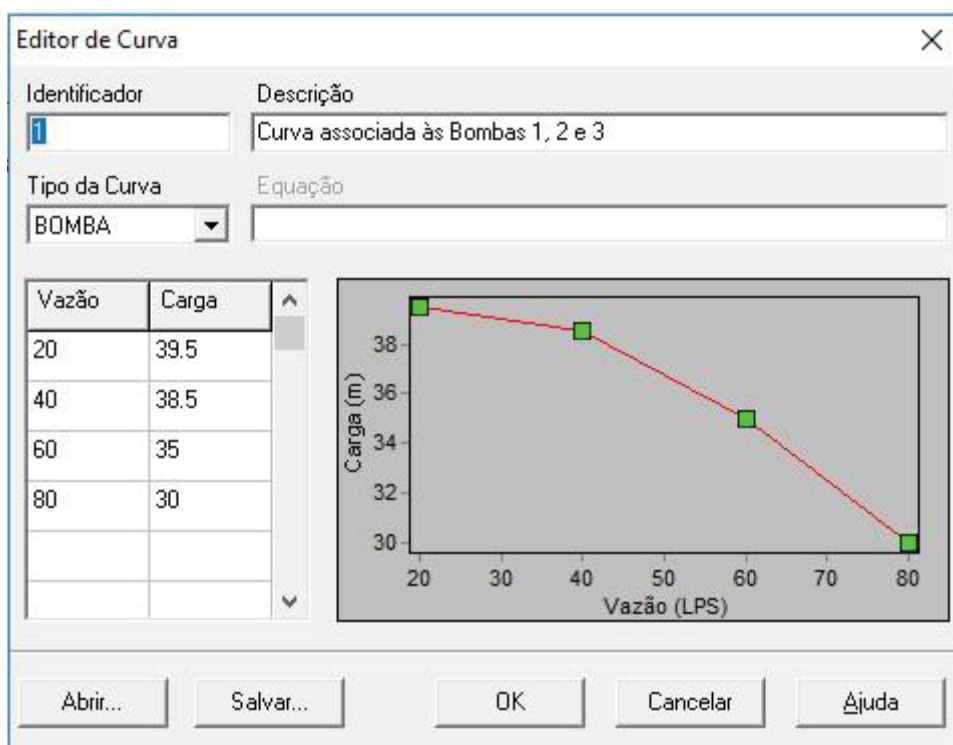
	<i>Booster</i>
Diâmetro (m)	100
Parâmetro de controle (m)	35
Coef. perda de carga singular	0

Os dados de entrada do *booster* apresentados na TABELA 21 foram todos retirados de cadastros fornecidos pela prestadora de serviços de saneamento municipal.

Com relação às bombas do sistema é necessário no Epanet inserir dados de vazão (L/s) e de carga (m) para cada uma das bombas para que o *software* gere uma curva de bomba.

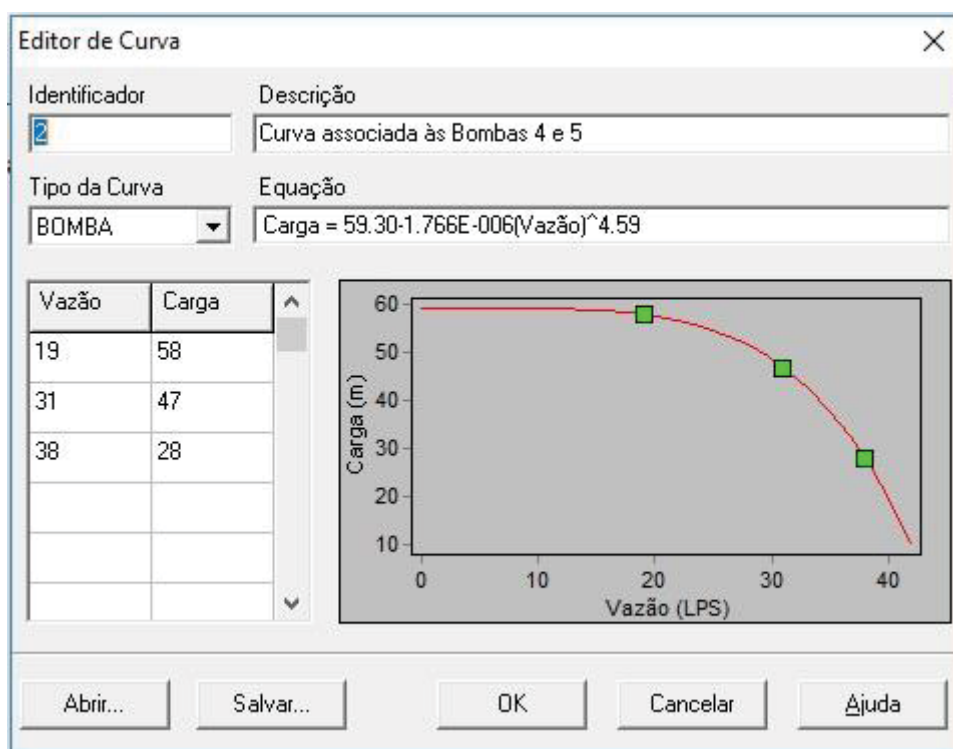
Para o Conjunto de Bombas 1, que estão localizadas pós ETA e Reservatório A, existem três bombas, mas apenas duas delas estão em operação. Na FIGURA 12 as Bombas 1 e 2 estão em operação e a Bomba 3 não está operando. Para cada uma dessas bombas foi gerada uma curva de bomba a partir de dados fornecidos pela própria prestadora de serviços de saneamento municipal. Na FIGURA 13 que segue são apresentadas as caixas de diálogo do Epanet para gerar as curvas de bomba deste conjunto.

FIGURA 13 – CAIXA DE DIÁLOGO DO EPANET PARA A GERAÇÃO DA CURVA DAS BOMBAS 1, 2 E 3



Já, no Conjunto de Bombas 2, se encontram duas bombas (Bomba 1 e Bomba 8) em operação após o Reservatório B. A seguir é apresentada a caixa de diálogo para geração da curva destas bombas (FIGURA 14) no Epanet.

FIGURA 14 – CAIXA DE DIÁLOGO DO EPANET PARA GERAÇÃO DA CURVA DAS BOMBAS 4 E 5

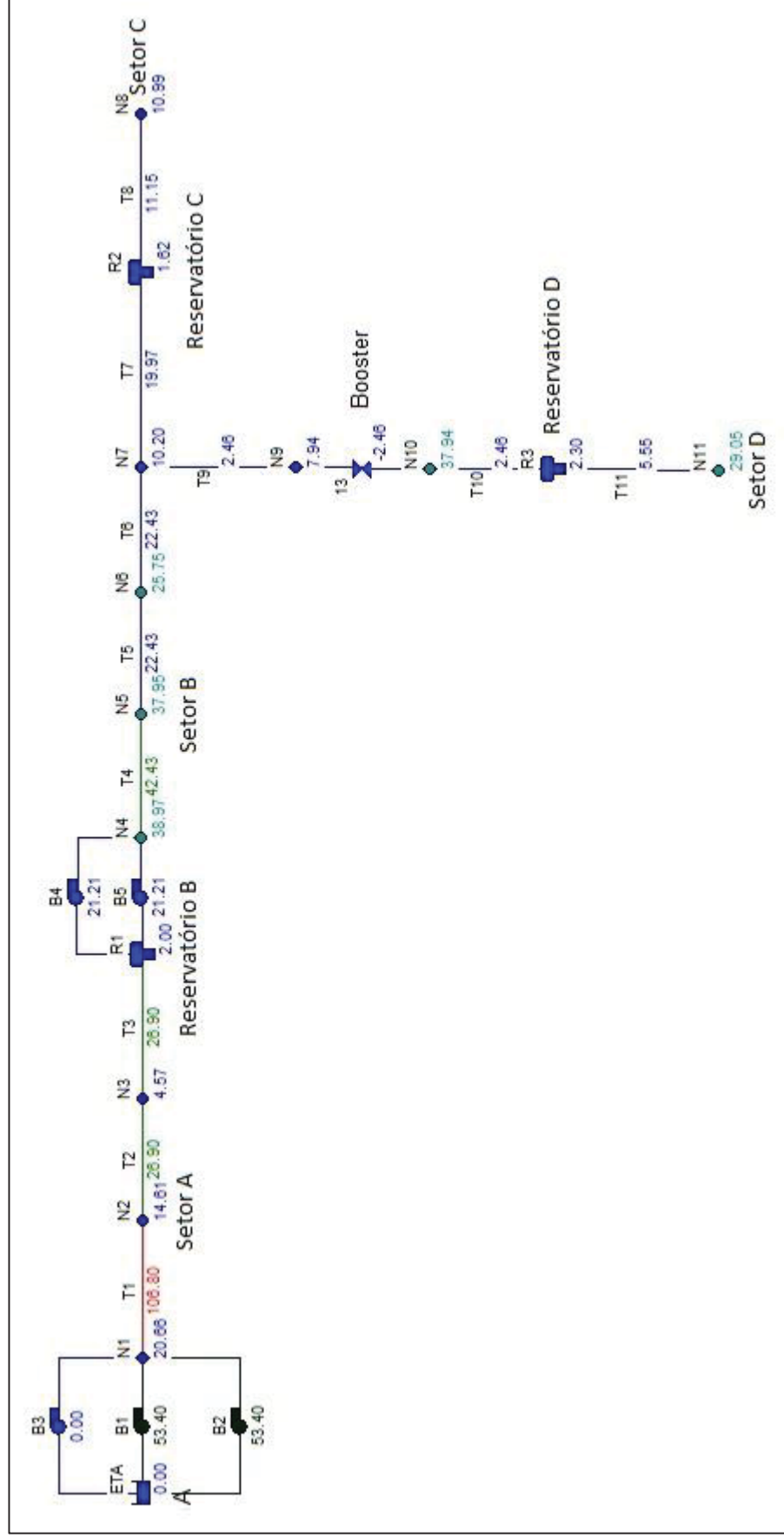


Os dados de entrada relacionados às bombas foram fornecidos por cadastros disponibilizados pela prestadora de serviços de saneamento municipal.

Após, então, a inserção de todos estes dados no Epanet, a simulação foi executada para o dia de maior consumo e foram obtidas as vazões em todos os trechos e as pressões em todos os nós do sistema.

A representação do dia de maior consumo no Epanet é mostrada na FIGURA 15.

FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA NO DIA DE MAIOR CONSUMO NO EPANET



Na FIGURA 15 estão sendo apresentadas as vazões (em L/s) correspondentes aos trechos do sistema e nos nós são mostradas as pressões (em m) correspondentes a cada um desses. E, além disso, nas bombas aparecem as vazões (em L/s) bombeadas em cada uma delas.

5.5.3 Validação do modelo

A fim de validar o modelo utilizado no Epanet foi elaborada uma análise estatística confrontando os dados de vazão reais horários fornecidos pela prestadora de serviços de saneamento com os dados de vazão horários simulados no *software* para o dia de maior consumo. A análise estatística utilizada foi a correlação de Pearson.

Foram, então, selecionados aleatoriamente 10 horas da amostra total. No *software* Epanet foram simuladas as situações reais de cada uma dessas horas a fim de verificar o resultado fornecido pelo modelo criado no *software*. Após a simulação, portanto, foi feita a correlação de Pearson entre os dados de vazão reais horários fornecidos pela prestadora de serviços de saneamento e os dados de vazão horários fornecidos pelo modelo criado no *software* Epanet.

A seguir são apresentados na TABELA 22 as vazões reais e as vazões simuladas para cada uma das horas escolhidas aleatoriamente e os seus respectivos coeficientes de correlação de Pearson (R).

TABELA 22 – DADOS DAS VAZÕES REAIS E SIMULADAS DAS HORAS ESCOLHIDAS ALEATORIAMENTE DENTRO DO DIA DE MAIOR CONSUMO E SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (R)

	Vazão de saída ETA e Reservatório A (L/s)		Vazão de entrada Reservatório B (L/s)		Vazão de saída Reservatório B (L/s)	
	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
02h	85,59	87,62	48,23	50,26	19,95	26,22
07h	117,21	105,27	41,38	29,44	45,85	57,96
09h	119,47	107,84	36,67	25,04	48,36	54,60
12h	120,62	111,95	24,56	15,89	42,86	39,60
15h	117,84	111,74	22,57	16,47	51,38	47,94
16h	116,37	110,57	25,19	19,39	52,54	60,40
18h	114,21	111,37	20,26	17,42	53,94	62,65
20h	122,38	113,01	22,02	12,65	44,12	54,80
21h	120,97	113,02	20,55	12,60	40,94	52,37
22h	122,38	111,41	17,33	17,33	38,83	50,78
	R = 0,95		R = 0,93		R = 0,85	

	Vazão de saída do <i>booster</i> (L/s)		Vazão de saída do Reservatório C (L/s)		Vazão de saída do Reservatório D (L/s)	
	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
02h	4,27	6,40	14,57	14,57	1,48	1,48
07h	4,47	5,15	1,98	1,98	3,36	3,36
09h	4,52	6,00	9,37	9,37	8,27	8,27
12h	5,52	6,21	21,29	21,29	10,90	10,90
15h	4,49	6,09	19,97	19,97	8,12	8,12
16h	4,56	5,91	5,69	5,69	5,69	5,69
18h	4,49	5,86	4,51	4,51	4,98	4,98
20h	5,35	5,99	4,04	4,04	6,01	6,01
21h	5,35	6,03	3,85	3,85	5,73	5,73
22h	5,39	6,05	3,64	3,64	6,94	6,94
R = 0,22			R = 1		R = 1	

Observa-se com a TABELA 22 que foram analisados seis dados de vazão para cada uma das horas escolhidas aleatoriamente. A correlação de Pearson foi aplicada, portanto, para cada série dessas seis vazões analisadas. É importante ressaltar que quanto mais o coeficiente de correlação de Pearson se aproxima de 1, maior é a correlação entre os dados. Assim, pode-se afirmar que, com exceção da vazão de saída do *booster*, o restante das vazões analisadas obtiveram altos índices de correlação, comprovando que o modelo fornece resultados muito próximos dos dados reais. A vazão de saída do *booster* foi a única que obteve um coeficiente de correlação baixo, pois o *booster* possui a função de inserir pressão na rede de distribuição de água e essa pressão varia de acordo com a demanda de água da população. Já no modelo, quando o *booster* é inserido trabalha-se com um pressão fixa. Acredita-se que esse é o principal motivo de o coeficiente de correlação de Pearson ter ficado muito abaixo de todos os outros.

5.5.4 Simulações das ações de eficiência hidroenergética no Epanet

Simularam-se no Epanet três ações principais, sendo a Ação 1 a detecção e correção de vazamentos, a Ação 2 o uso racional da água e a Ação 3 a substituição das adutoras antigas por adutoras novas. Cada uma dessas ações foi aplicada em setores específicos do sistema em estudo e apresentou diferentes objetivos. No QUADRO 5 é apresentado um resumo dessas ações, seus setores de aplicação, seus objetivos e quais setores serão influenciados diretamente por essas ações.

QUADRO 5 – RESUMO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA SIMULADAS NO EPANET, OS SETORES DE APLICAÇÃO, OBJETIVOS E SETORES QUE SERÃO INFLUENCIADOS POR ESTAS

Ação principal		Setor de Aplicação	Ação específica	Objetivo	Setor que será influenciado pela ação
1	Detecção e correção de vazamentos	A	1.1	Aumentar a cobertura populacional no setor A	A
			1.2	Aumentar a cobertura populacional no setor B	B
		B	1.3	Aumentar a cobertura populacional no setor B	B
			1.4	Aumentar a cobertura populacional nos setores A, C e D	A, C e D
2	Uso racional da água	C	2.1	Aumentar a cobertura populacional no setor C	C
			2.2	Aumentar a cobertura populacional no setor B	B
		D	2.3	Aumentar a cobertura populacional no setor D	D
			2.4	Aumentar a cobertura populacional no setor B	B
3	Substituição das adutoras antigas por novas	Entre a captação na ETA e Reservatório A e o Reservatório B	3.1	Aumentar a cobertura populacional no setor A	A
			3.2	Aumentar a cobertura populacional no setor B	B
		Entre o Conjunto de Bombas 2 até os setores C e D	3.3	Aumentar a cobertura populacional do setor B	B
			3.4	Aumentar a cobertura populacional do setor C e D	C e D

Cada uma das ações e objetivos mostrados no QUADRO 5 serão explicadas no texto que segue.

Ação 1: Detecção e correção de vazamentos

Essa estratégia foi aplicada nos setores A e B, pois esses dois setores são os que possuem maiores índices de perdas de água de todo o sistema.

Assumiu-se, então, a correção de 50% dos vazamentos no dois setores.

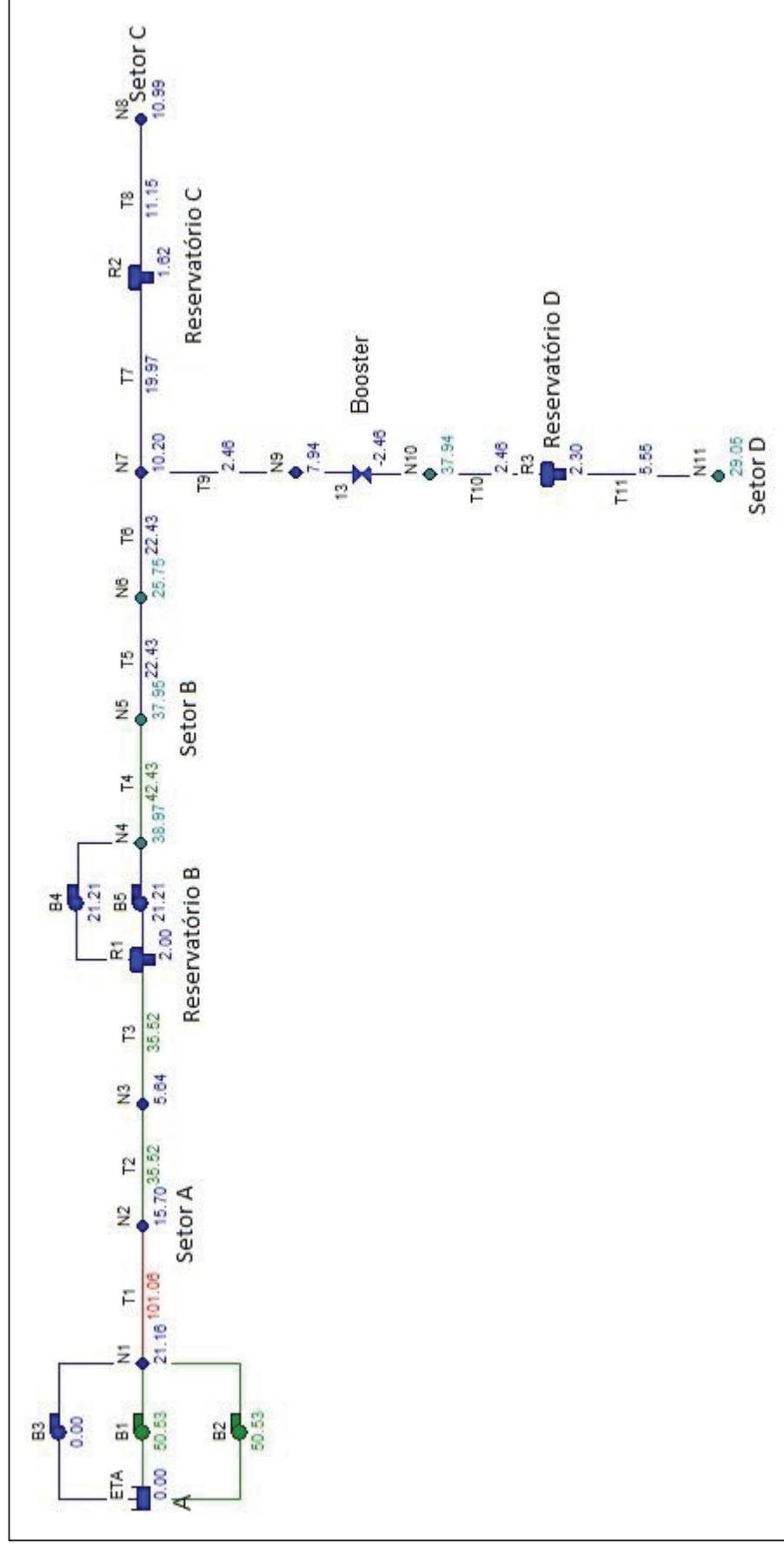
A estratégia foi aplicada separadamente nos dois setores.

Setor A

O consumo “per capita” total no setor A no dia de maior consumo era de 259,98 L/hab.dia. Com a implantação da Ação 1 no setor, esse consumo “per capita” total reduziu-se para 213,24 L/hab.dia. Com isso, o consumo do setor que no dia de maior consumo era de 79,9 L/s diminuiu para 65,54 L/s.

No Epanet, portanto, foi simulada essa ação no setor A e obteve-se o seguinte cenário.

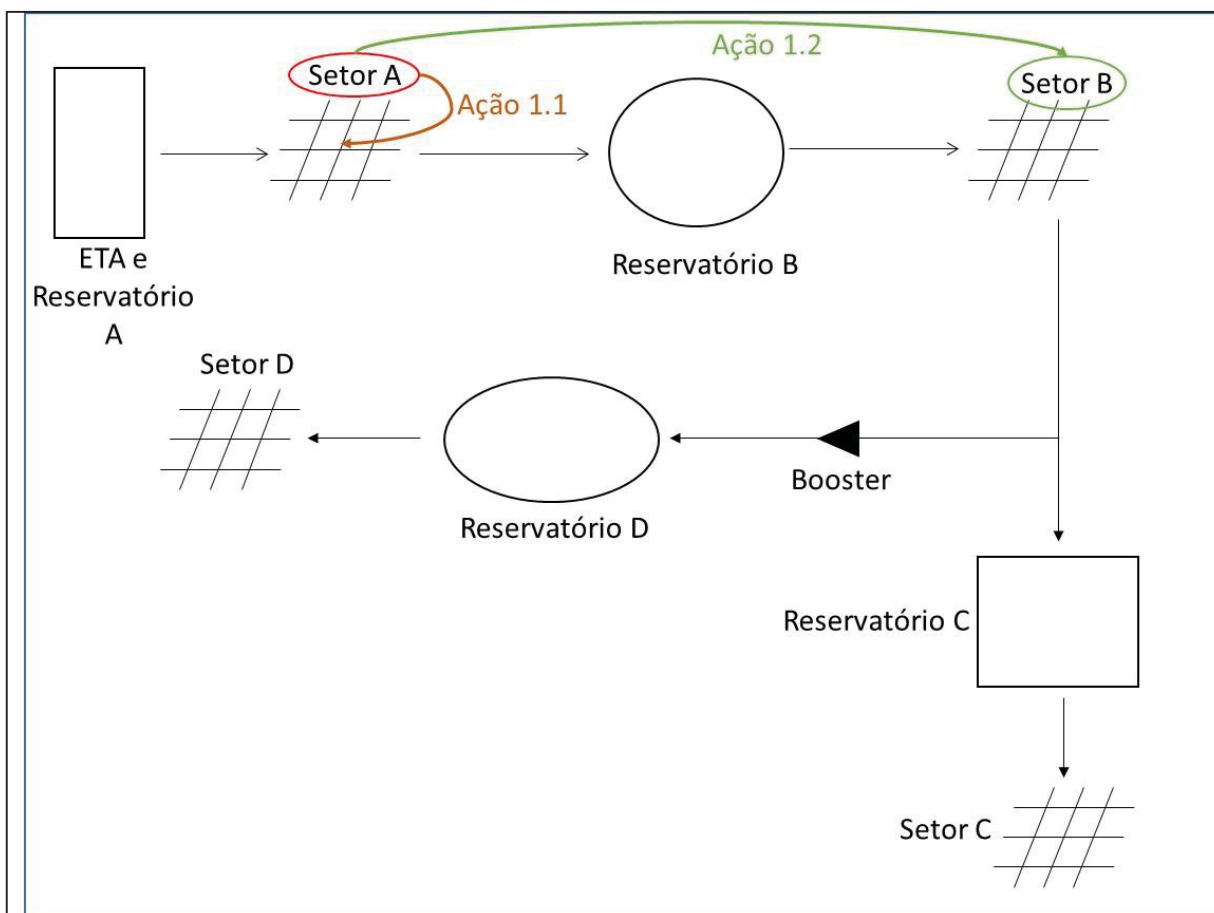
FIGURA 16 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 1 NO SETOR A



Como é possível observar na FIGURA 16, com a redução de consumo no setor A devido à correção de 50% dos vazamentos nesse setor, houve, consequentemente, uma redução na vazão bombeada que se reduziu de 106,8 L/s para 101,06 L/s e aumento na vazão de entrada no Reservatório B de 26,90 L/s para 35,52 L/s.

Com essa situação há a possibilidade de se manter as vazões bombeadas fixas no Conjunto de Bombas 1 e utilizar o volume bombeado a mais de água para aumentar a cobertura populacional no próprio setor A (Ação 1.1) ou reduzir as vazões bombeadas no Conjunto de Bombas 1, abastecer toda a população do setor A e utilizar a vazão a mais que vai para o Reservatório B para aumentar a cobertura populacional no setor B (Ação 1.2). Essas duas ações são ilustradas na FIGURA 17.

FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 1.1 E 1.2 NO SETOR A



A seguir são apresentadas essas duas possibilidades e como se comportam os critérios selecionados para cada uma delas.

Ação 1.1: Detecção e correção de vazamentos no setor A com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no próprio setor

Nessa ação mantêm-se as vazões bombeadas no Conjunto de Bombas 1 e o volume de água bombeado a mais devido à redução do consumo per capita total no setor A é utilizado com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no próprio setor. Com isso, é possível abastecer 5818 habitantes a mais do que já estava sendo abastecido no setor.

Com relação aos critérios selecionados, cobertura populacional, vazão captada, consumo de energia e custo de implantação, a Ação 1.1 apresenta os resultados mostrados na TABELA 23.

TABELA 23 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.1 NO SETOR A

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	121,91%
Vazão captada	100%
Consumo de energia	100%
Custo de Implantação	R\$ 979/km

Verificou-se que houve um aumento na cobertura populacional do setor A para 121,91%, representando o abastecimento de 5818 habitantes a mais nesse setor. Já com relação à vazão captada e ao consumo de energia não houve mudança em relação ao cenário inicial, pois manteve-se a mesma vazão bombeada no dia de maior consumo. E, por fim, com relação ao custo de implantação foi realizado um levantamento acerca de licitações contratadas por uma empresa prestadora de serviços de saneamento para o serviço de detecção acústica de vazamentos não visíveis e identificação de vazamentos visíveis em redes de distribuição de água, incluindo ramais, registros e outras singularidades nos SAA e chegou-se a um custo médio de detecção de R\$ 779,00 por quilômetro (km) de tubulação investigado. Além da pesquisa e detecção de vazamentos assumiu-se a hipótese de que o reparo dos vazamentos possui um custo médio de R\$ 200,00 por quilômetro (km) reparado. Assim, foi considerado um custo de implantação total da ação de detecção e correção de vazamentos de R\$ 979,00 por quilômetro (km) de tubulação investigada e reparada.

Ação 1.2: Detecção e correção de vazamentos no setor A com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setor B

Nessa ação as vazões bombeadas no Conjunto de Bombas 1 são reduzidas, toda a população do setor A é abastecida e o volume de água a mais que é enviado para o Reservatório B é utilizado com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setor B. Com essa ação é possível abastecer 4659 habitantes a mais no Setor B.

Os resultados dos critérios selecionados após a aplicação desta ação são apresentados na TABELA 24.

TABELA 24 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.2 NO SETOR A

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	143,10%
Vazão captada	94,63%
Consumo de energia	95,91%
Custo de Implantação	R\$ 979/km

Houve um aumento da cobertura populacional no Setor B para 143,10%, representando 4659 habitante a mais abastecidos nesse setor. Já para os critérios vazão bombeada e consumo de energia, houve uma redução na vazão captada pelo Conjunto de Bombas 1 para 94,63% e também houve uma redução no consumo de energia pelo mesmo conjunto de bombas para 95,91% em relação à situação inicial. E, por fim, para o custo de implantação da ação foi mantido o custo médio de R\$ 979,00 por quilômetro (km) de tubulação investigada e reparada.

Setor B

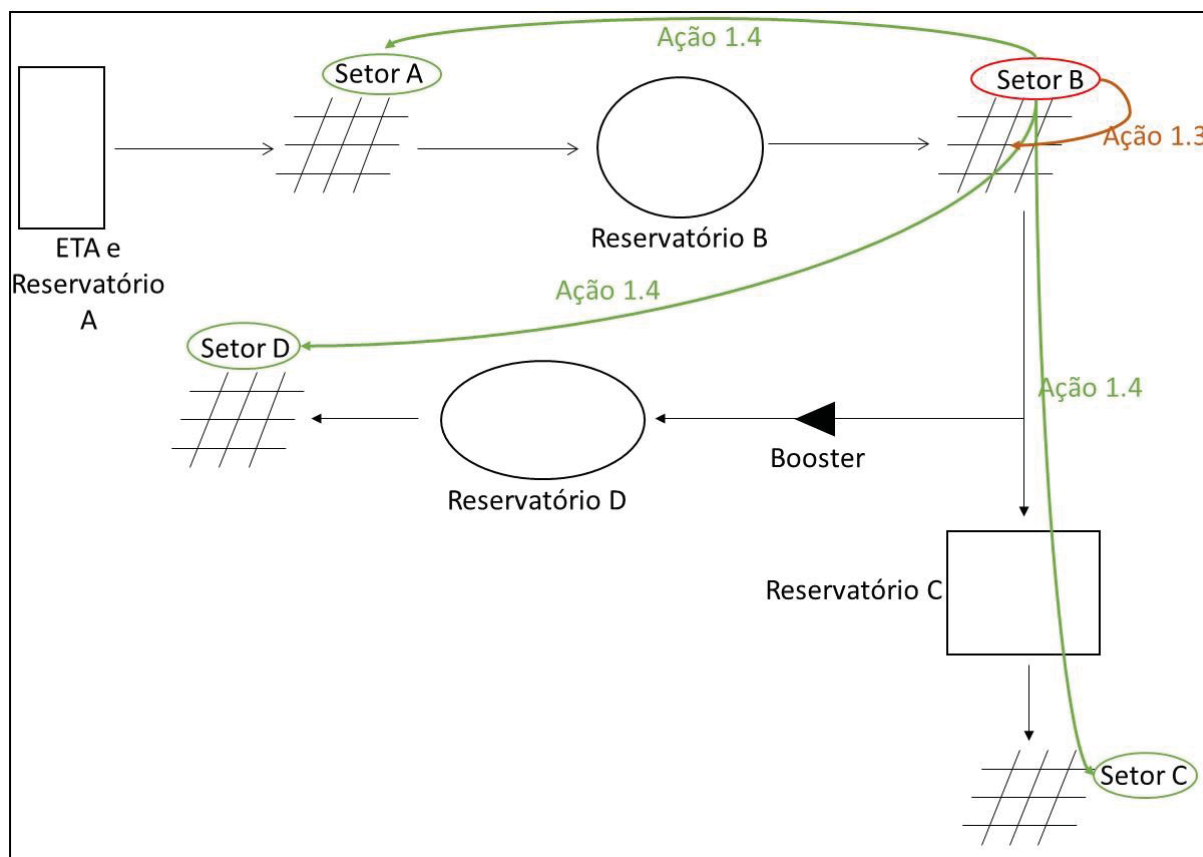
O consumo per capita total no Setor B no dia de maior consumo era de 159,86 L/hab.dia. Com a detecção e correção de 50% dos vazamentos neste setor o consumo per capita total reduziu-se para 103,49 L/hab.dia. Com isso, a vazão de consumo no setor que no dia de maior consumo que era de 20 L/s reduziu-se para 12,95 L/s.

Com a execução dessa ação no Setor B, obteve-se o seguinte cenário, apresentado na FIGURA 18.

Na FIGURA 18 nota-se que houve diminuição na vazão bombeada pelo Conjunto de Bombas 2 de 42,43 L/s para 36,56 L/s. Já, a vazão que vai em direção aos Reservatórios C e D teve um acréscimo. A vazão que abastece o Reservatório D que anteriormente à aplicação da ação era de 2,46 L/s aumentou para 2,65 L/s e a vazão que abastece o Reservatório C que era de 19,97 L/s após a ação elevou-se para 20,96 L/s.

Novamente existem duas possibilidades na aplicação dessa ação no Setor B. A primeira possibilidade é manter as vazões bombeadas pelo Conjunto de Bombas 2 do dia de maior consumo com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no próprio Setor B (Ação 1.3). Já, a outra possibilidade é diminuir a vazão bombeada pelo Conjunto de Bombas 2, utilizar esse volume de água reduzido no bombeamento para aumentar a cobertura populacional do Setor A e utilizar o volume de água a mais enviado para os Setores C e D para aumentar a cobertura populacional nesses setores (Ação 1.4). Essas ações são ilustradas na FIGURA 19.

FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 1.3 E 1.4 NO SETOR B



A seguir são apresentadas as duas ações propostas acima e o resultados dos critérios.

Ação 1.3: Detecção e correção de vazamentos no Setor B com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no próprio setor

Nessa ação o objetivo é aumentar a cobertura populacional no próprio Setor B utilizando o volume de água bombeado a mais pelo Conjunto de Bombas 2 para este fim. Com esse volume de água a mais é possível abastecer 5886 habitantes a mais no setor.

Com relação aos critérios selecionados seus resultados são apresentados na TABELA 25.

TABELA 25 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS A APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.3 NO SETOR B

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	154,45%
Vazão captada	100%
Consumo de energia	100%
Custo de implantação	R\$ 979/km

Como o objetivo dessa ação é o aumento da cobertura populacional no Setor B, observou-se na TABELA 25, no critério cobertura populacional que houve um aumento para 154,45% em relação ao dia de maior consumo. Esse aumento representa o abastecimento de 5886 habitantes a mais no setor. Por outro lado, os critérios vazão captada e consumo de energia não se alteraram em relação ao cenário do dia de maior consumo, pois a vazão bombeada pelo Conjunto de Bombas 2 manteve-se a mesma. E, para o critério custo de implantação dessa ação no setor, manteve-se o mesmo custo já apresentado anteriormente, R\$ 979,00 por quilômetro (km) de tubulação investigada e reparada.

Ação 1.4: Detecção e correção de vazamentos no Setor B com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setores A, C e D

Nessa ação a vazão bombeada pelo Conjunto de Bombas 2 é reduzida devido ao menor consumo de água no Setor B. Essa redução da vazão bombeada leva esse

volume de água reduzido a poder ser utilizado no Setor A para aumentar sua cobertura populacional. Já o volume de água a mais que é enviado para os Setores C e D são utilizados com o objetivo de aumentar a cobertura populacional desses dois setores. Ou, ainda, esse volume de água que deixa de ser captado pode ser utilizado no Setor A a fim de aumentar a sua cobertura populacional.

Com isso, têm-se os resultados de critérios para cada um dos setores em que ocorreu o aumento da cobertura populacional.

Na TABELA 26 são apresentados os resultados dos critérios para essa ação.

TABELA 26 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS A APLICAÇÃO DA AÇÃO 1.4 NO SETOR B

Critérios	Resultados
Cobertura populacional Setor A	107,35%
Cobertura populacional Setor C	126,42%
Cobertura populacional Setor D	103,82%
Vazão bombeada	86,17%
Consumo de energia	90,33%
Custo de implantação	R\$ 979/km

O volume reduzido no bombeamento pelo Conjunto de Bombas 2 foi utilizado para aumentar a cobertura populacional no Setor A, assim a cobertura populacional nesse setor aumentou para 107,35%, representando o abastecimento de 1951 habitante a mais no setor. No Setor C houve um aumento da cobertura populacional para 126,42%, representando 296 pessoas a mais abastecidas nesse setor. E, no Setor D, o aumento na cobertura populacional foi de 103,82%, o que representa 64 habitantes a mais abastecidos no setor. Já os critérios vazão bombeada e consumo de energia pelo Conjunto de Bombas 2 tiveram reduções em relação à situação do dia de maior consumo, sendo a vazão captada reduzida para 86,17% e o consumo de energia para 90,33%. Com relação ao custo de implantação, manteve-se o custo médio já explicado anteriormente de R\$ 979,00 por quilômetros (km) de tubulação investigada e reparada.

Ação 2: Uso racional da água

Essa ação foi aplicada nos setores C e D, pois esses dois setores possuem altos índices de consumo per capita efetivo de água.

Assumiu-se, portanto, uma redução de 15% no consumo per capita efetivo de água nos dois setores.

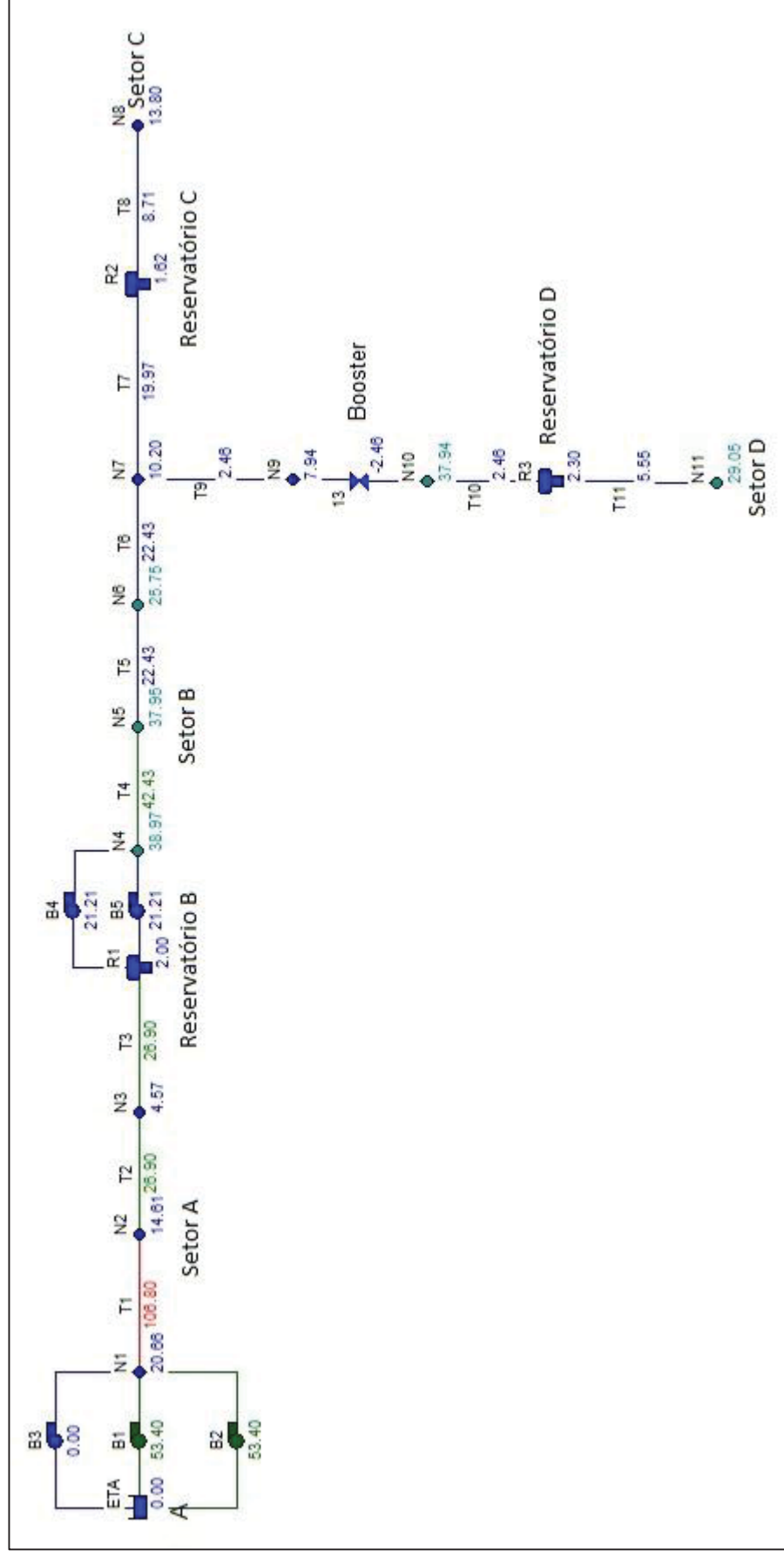
As ações foram aplicadas separadamente nos setores e são apresentadas a seguir.

Setor C

O Setor C no dia de maior consumo possui um consumo per capita efetivo de água de 727,54 L/hab.dia. Com a aplicação da ação 2 nesse setor, o consumo per capita efetivo de água reduz-se para 618 L/hab.dia no setor. Consequentemente, a vazão de consumo no setor que no dia de maior consumo era de 10,25 L/s foi reduzida para 8,71 L/s.

A FIGURA 20 apresenta a situação do sistema após a aplicação dessa ação no Setor C.

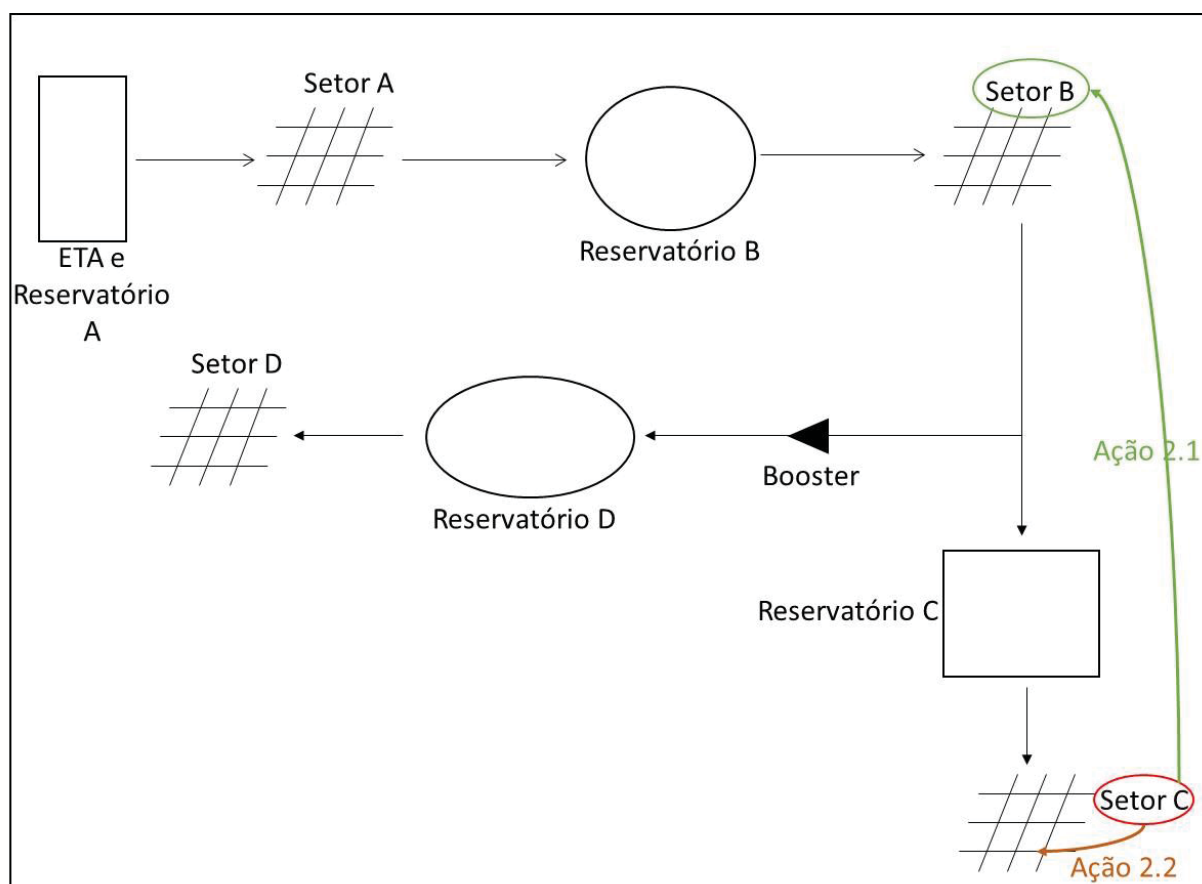
FIGURA 20 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2 NO SETOR C



Percebeu-se que como a população do Setor C diminuiu seu consumo per capita efetivo de água, a vazão que vai para o setor, conseqüentemente, é reduzida.

Com essa situação é possível a existência de dois cenários, um deles em que a vazão enviada para o Setor C mantém-se a mesma do dia de maior consumo e o objetivo nesse caso seria o aumento da cobertura populacional no próprio setor (Ação 2.1). E, o outro cenário seria aumentar a cobertura populacional no Setor B com o volume de água que não é mais enviado ao Setor C, sendo esse volume agora utilizado no abastecimento do Setor B (Ação 2.2). Essas ações demonstradas na FIGURA 21.

FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 2.1 E 2.2 NO SETOR B



Essas duas ações são apresentadas na sequência.

Ação 2.1: Uso Racional da Água no Setor C com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no próprio setor

Nessa ação o objetivo é utilizar o volume de água a mais que é enviado para o Setor C para aumentar a cobertura populacional no próprio setor.

Com isso, os resultados dos critérios após a aplicação dessa ação no setor são apresentados na TABELA 27.

TABELA 27 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.1 NO SETOR C

Critério	Resultados
Cobertura populacional	148,29%
Vazão captada	100%
Consumo de energia	100%
Custo de implantação	R\$ 0

É possível perceber com a TABELA 27 que houve um aumento da cobertura populacional para 148,29%, representando 541 habitantes a mais sendo abastecidos nesse setor. Já a vazão captada e o consumo de energia do Conjunto de Bombas 2 mantiveram-se os mesmos. E, por fim, em relação ao critério custo de implantação, como trata-se de uma sensibilização dos usuários considerou-se que não há custo de implantação.

Ação 2.2: Uso racional da água no Setor C com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setor B

O objetivo nessa ação é utilizar o volume de água que não será enviado para o Setor C para aumentar a cobertura populacional no Setor B.

Os resultados dos critérios para essa ação são mostrados na TABELA 28.

TABELA 28 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.2 NO SETOR C

Crítérios	Resultados
Cobertura populacional	107,70%
Vazão bombeada	100%
Consumo de energia	100%
Custo de implantação	R\$ 0

Observa-se com a TABELA 28 que houve um aumento da cobertura populacional no Setor B para 107,70%, o que representa 832 habitantes a mais sendo abastecidos nesse setor. Já, a vazão captada e o consumo de energia no Conjunto de Bombas 2 mantiveram-se os mesmos. E, para o critério custo de implantação,

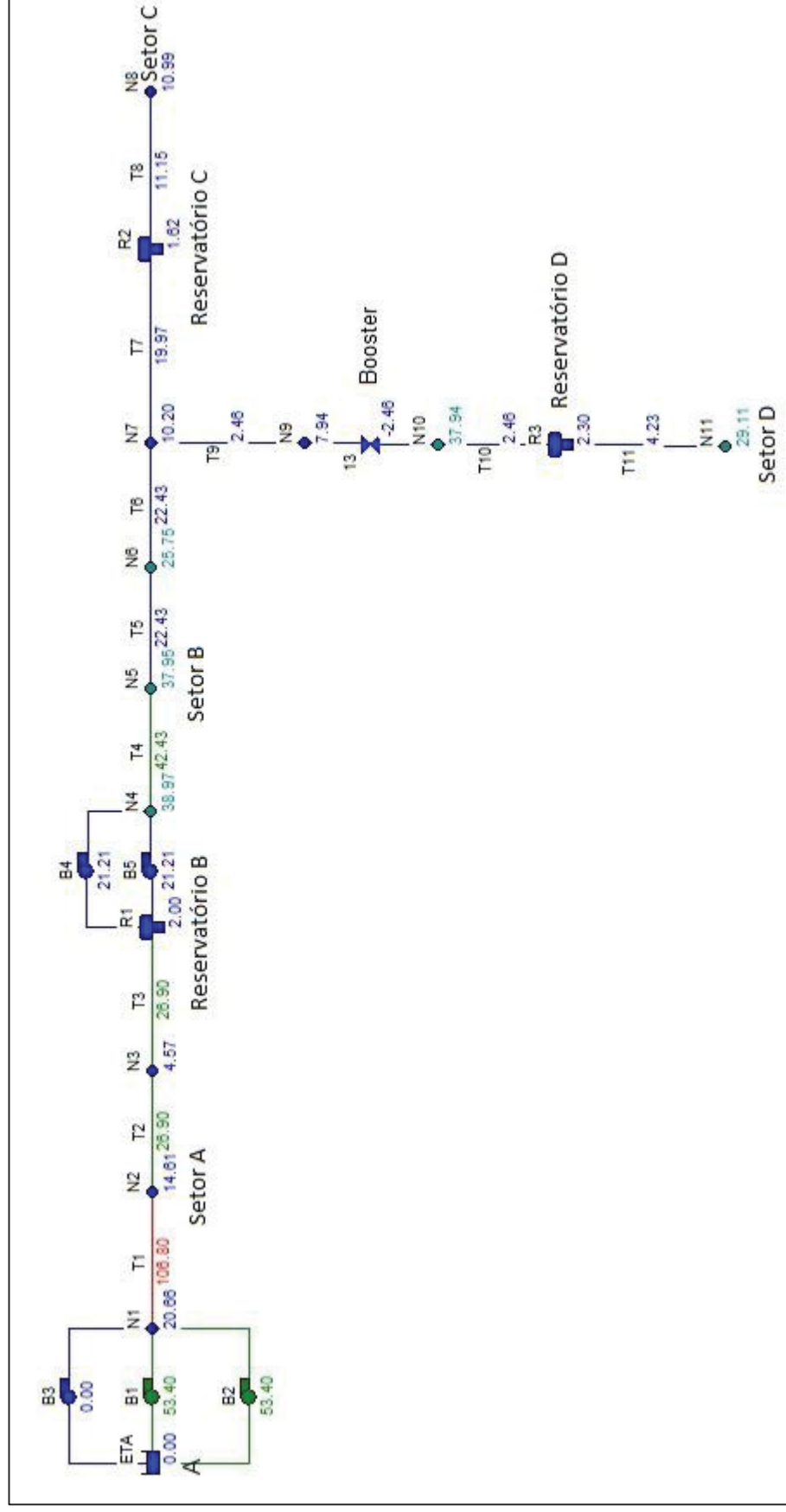
novamente, como trata-se de uma sensibilização dos usuários, considerou-se que não houve custo para implantação.

Setor D

No Setor D no dia de maior consumo, o consumo per capita efetivo de água era de 243,85 L/hab.dia. Com a aplicação da Ação 2, reduzindo 15% desse consumo, o novo consumo per capita efetivo de água reduziu-se para 207 L/hab.dia. Com isso, a vazão que era de 4,98 L/s no dia de maior consumo diminuiu para 4,23 L/s após a execução dessa ação.

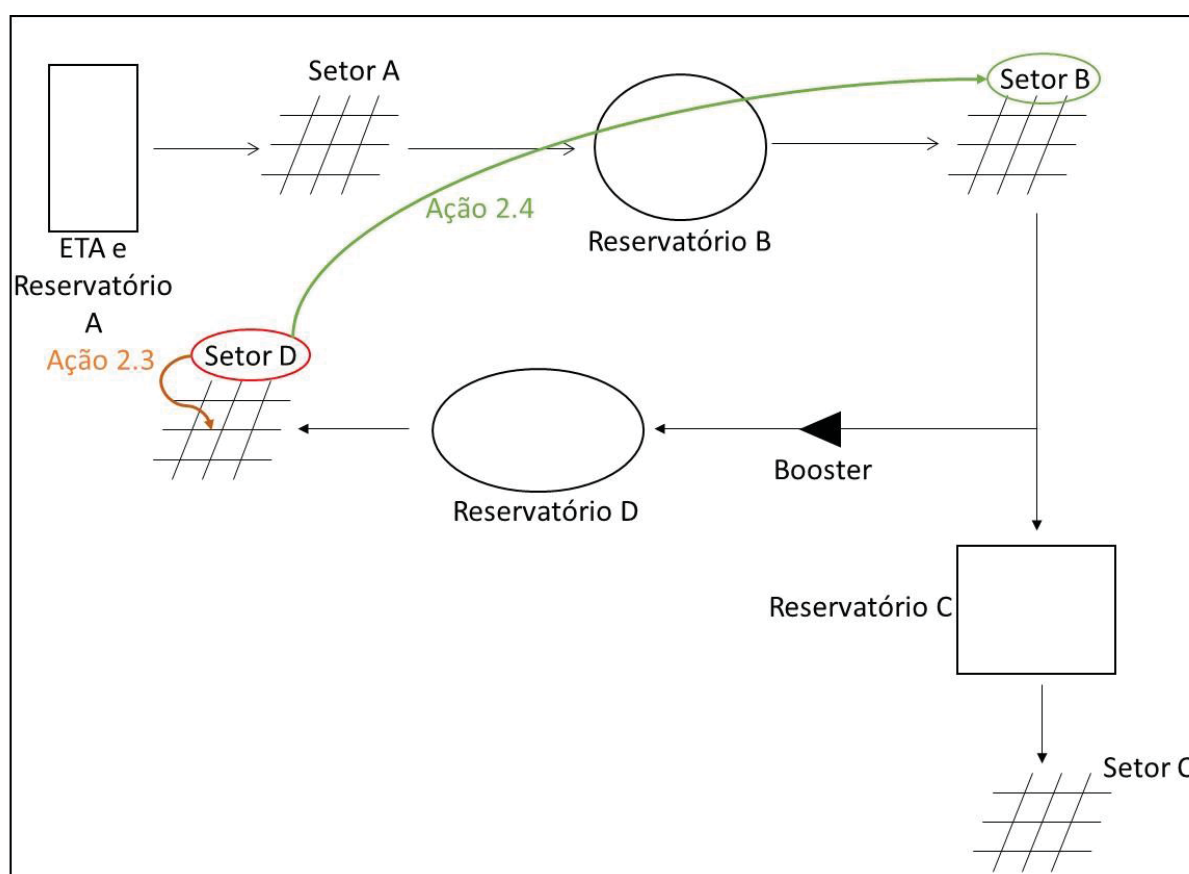
A FIGURA 22 mostra como fica a situação do sistema após a aplicação dessa ação.

FIGURA 22 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2 NO SETOR D



Novamente existem duas possibilidades devido à aplicação da ação nesse setor. Uma delas é continuar enviando a mesma vazão do dia de maior consumo para o Setor D e utilizar a vazão que é enviada a mais para aumentar a cobertura populacional do próprio setor (Ação 2.3). Já, a segunda possibilidade é deixar de enviar a vazão do dia de maior consumo para o Setor D e utilizar essa vazão que não é enviada para aumentar a cobertura populacional do Setor B (Ação 2.4). As ações 2.3 e 2.4 são representadas esquematicamente na FIGURA 23.

FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICAS DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 2.3 E 2.4 NO SETOR D



São apresentadas a seguir essas duas possibilidades.

Ação 2.3: Uso racional da água no Setor D com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no próprio setor

Nessa ação o objetivo principal é utilizar a vazão de água que é enviada a mais para o Setor D para abastecer mais pessoas no próprio setor.

São apresentadas na TABELA 29 os resultados dos critérios para essa ação.

TABELA 29 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS A APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.3 NO SETOR D

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	117,70%
Vazão captada	100%
Consumo de energia	100%
Custo de implantação	R\$ 0

Na TABELA 29 é possível observar que com a aplicação dessa ação há um aumento na cobertura populacional do próprio Setor D para 117,70%, representando o abastecimento de 295 habitantes a mais no setor. Já, os critérios vazão captada e consumo de energia no Conjunto de Bombas 2 mantiveram-se constantes. E, para o critério custo de implantação como trata-se de uma sensibilização dos usuários considerou-se que não houve custo.

Ação 2.4: Uso racional da água no Setor D com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setor B

A aplicação dessa ação tem por objetivo aumentar a cobertura populacional do Setor B utilizando o volume de água que não é mais enviado ao Setor D.

Na TABELA 30 a seguir são apresentados os resultados dos critérios para a aplicação dessa ação.

TABELA 30 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 2.4 NO SETOR D

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	103,75%
Vazão captada	100%
Consumo de energia	100%
Custo de implantação	R\$ 0

Na TABELA 30 é mostrado que houve um aumento na cobertura populacional no Setor B para 103,75%, o que representa 405 pessoas a mais sendo abastecidas nesse setor. Além disso, os critérios vazão captada e consumo de energia do Conjunto de Bombas 2 mantiveram-se constantes. E, por último, para o critério custo de implantação considerou-se que não houve custo, pois trata-se apenas de uma sensibilização dos usuários.

Ação 3: Substituição das adutoras antigas por novas

Como foi constatado que todas as adutoras que compõem o sistema já foram instaladas há algum tempo, uma das ações a serem executadas é a substituição de todas elas por adutoras novas.

Com a substituição das adutoras antigas por novas, a principal consequência é o aumento da vazão transportada por essas adutoras devido ao aumento do coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams.

Essa ação foi executada no sistema por etapas, como será apresentado a seguir.

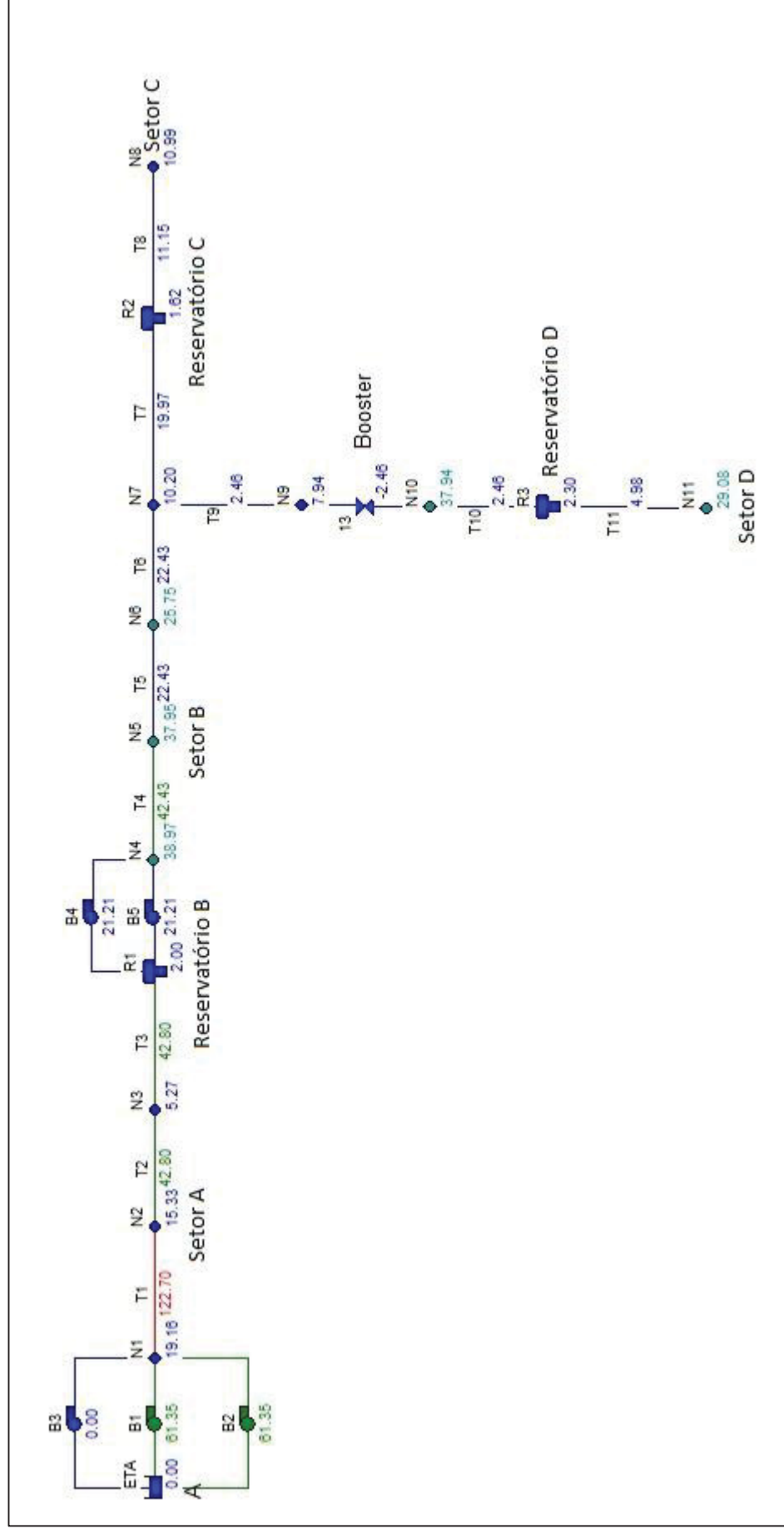
Setor entre a ETA e Reservatório A e o Reservatório B

Nessa etapa foram substituídas as adutoras que estão entre a captação que ocorre na ETA e Reservatório A até o Setor A e entre o Setor A e o Reservatório B.

A adutora entre a captação e o Setor A é de ferro fundido e foi substituída por uma nova tubulação de mesmo material sendo considerado, portanto, um coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams para tubulação de ferro fundida nova de 130. Já, a adutora entre o Setor A e o Reservatório B é de PVC Defofo e foi substituída por uma tubulação nova de mesmo material com coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams de 140.

Na FIGURA 24 observa-se como fica o sistema após a substituição das adutoras nesse setor.

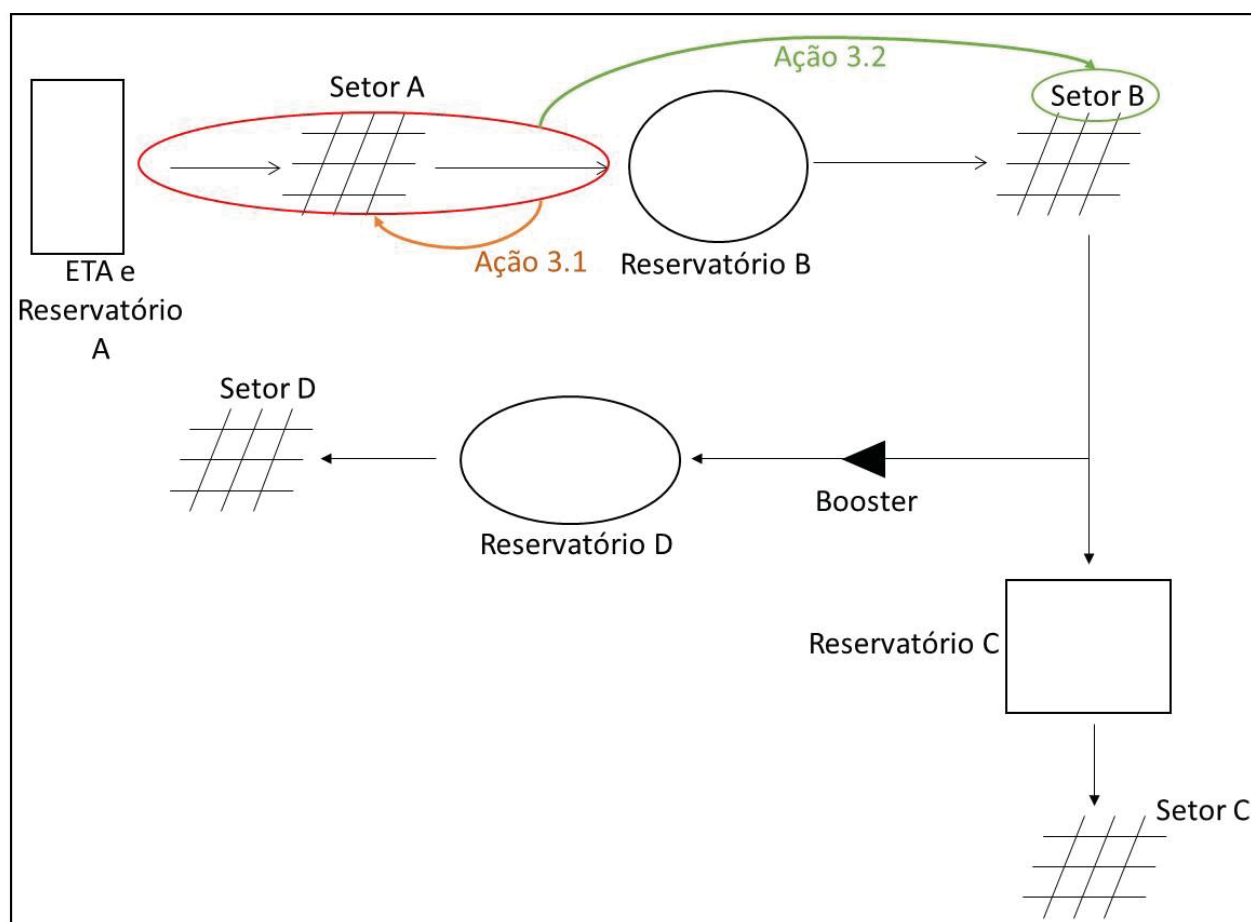
FIGURA 24 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3 NO SETOR ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E RESERVATÓRIO B



Observa-se na FIGURA 24 que devido à troca das adutoras entre a captação na ETA e Reservatório A e o Reservatório B houve um aumento nas vazões desses trechos. Entre a ETA e Reservatório A e o Setor A, a vazão aumentou para 122,70 L/s e após o Setor A até o Reservatório B a nova vazão agora é de 42,80 L/s.

Esses aumentos de vazões podem ser utilizados com duas finalidades. A primeira seria utilizar a vazão enviada a mais para o Setor A para aumentar a cobertura populacional nesse mesmo setor (Ação 3.1). E, a segunda finalidade seria utilizar essa vazão a mais para aumentar a cobertura populacional no Setor B (Ação 3.2). Essas ações são apresentadas na FIGURA 25.

FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 3.1 E 3.2 NO SETOR ENTRE A ETA E RESERVATÓRIO A E O RESERVATÓRIO B



Essas duas possibilidades são apresentadas a seguir.

Ação 3.1: Substituição das adutoras entre a ETA e Reservatório A e o Reservatório B com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setor A

Nessa ação o objetivo é utilizar a vazão que está sendo transportada a mais pela adutora entre a ETA e Reservatório A e o Setor A para aumentar a cobertura população nesse mesmo setor.

Os resultados dos critérios após a aplicação dessa ação são apresentadas na seguinte TABELA 31.

TABELA 31 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.1 NO SETOR ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E RESERVATÓRIO B

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	110,85%
Vazão captada	107,63%
Consumo de energia	105,09%
Custo de implantação	R\$ 276.000,00/km

Com a TABELA 31 percebe-se que houve um aumento na cobertura populacional no Setor A para 110,85%, representando 2881 habitantes a mais sendo abastecidos nesse setor. Já com relação à vazão captada e ao consumo de energia devido ao aumento da vazão transportada pelas adutoras ocorreu também um aumento em relação a esses critérios, a vazão captada aumentou para 107,63% e o consumo de energia para 105,09%. Por fim, para o critério custo de implantação foi feita uma estimativa em relação aos valores que seriam gastos na substituição de todas as adutoras e chegou-se ao custo médio de R\$ 276.000,00 por quilômetro (km) de tubulação substituída.

Ação 3.2: Substituição das adutoras entre a ETA e Reservatório A e o Reservatório B com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setor B

Com a aplicação dessa ação a vazão transportada a mais pelas adutoras é utilizada para aumentar a cobertura populacional no Setor B.

Na TABELA 32 que segue são apresentados os resultados dos critérios após aplicação da ação.

TABELA 32 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.2 NO SETOR ENTRE ETA E RESERVATÓRIO A E RESERVATÓRIO B

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	143,36%
Vazão captada	107,63%
Consumo de energia	105,09%
Custo de implantação	R\$ 276.000,00/km

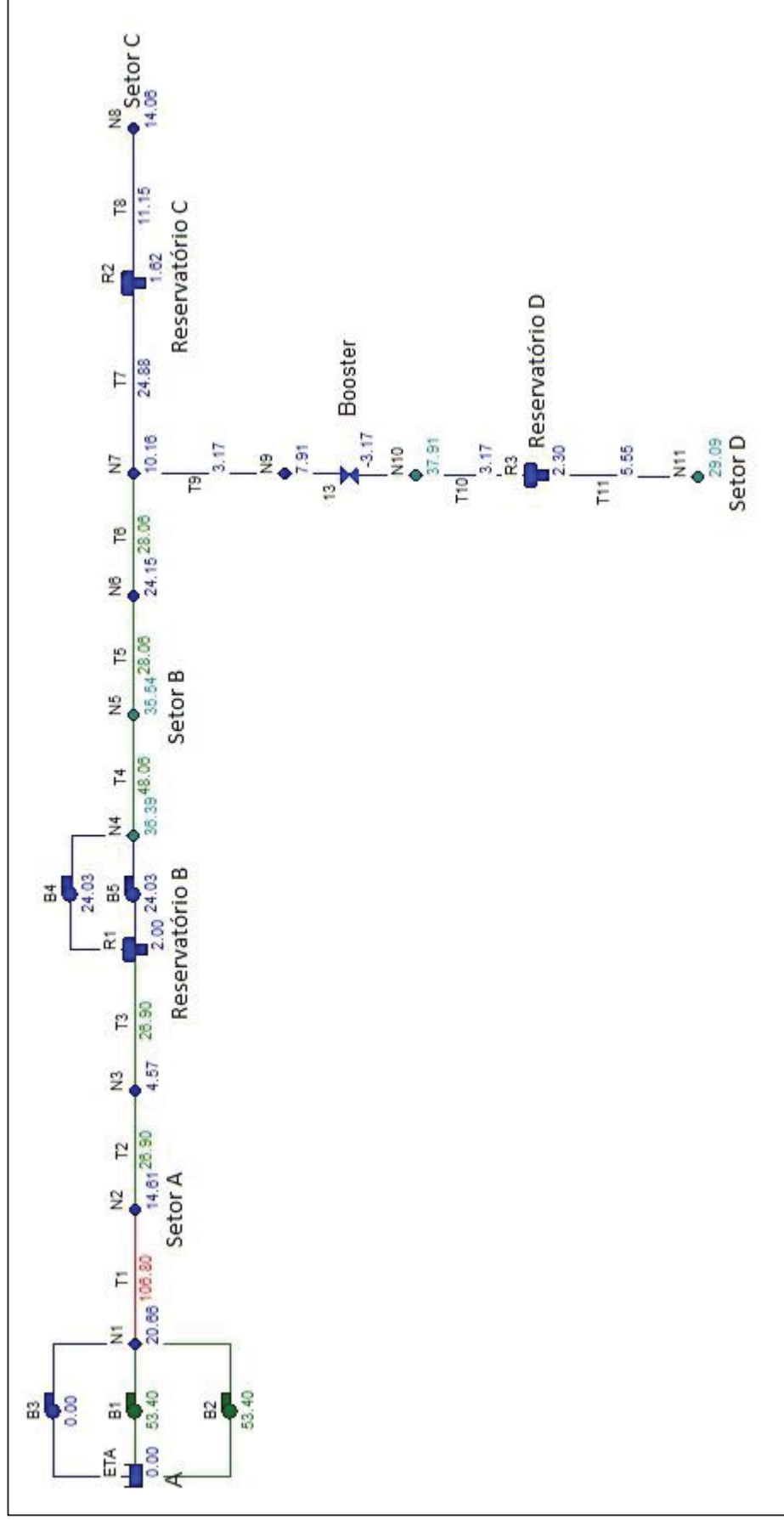
Observando a TABELA 32 após a aplicação da ação 3.2 houve um aumento da cobertura populacional no Setor B para 143,36%, o que representa o abastecimento de 4687 pessoas a mais nesse setor. Os critérios vazão captada e consumo de energia também tiveram aumentos, a vazão captada aumentou para 107,63% em relação ao dia de maior consumo e o consumo de energia aumentou para 105,09%. Além disso, para o critério custo de implantação da ação, como já explicado anteriormente, considerou-se o custo de implantação de R\$ 276.000,00 por quilômetro (km) de tubulação substituída.

Setor entre o Conjunto de Bombas 2 até os Setores C e D

Nessa etapa foram substituídas todas adutoras que se localizam após o Conjunto de Bombas 2. Todas essas adutoras são de PVC Defofo e serão, então, substituídas por novas adutoras de mesmo material com coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams 140.

Com isso, a FIGURA 26 apresenta como fica o sistema após a substituição dessas adutoras.

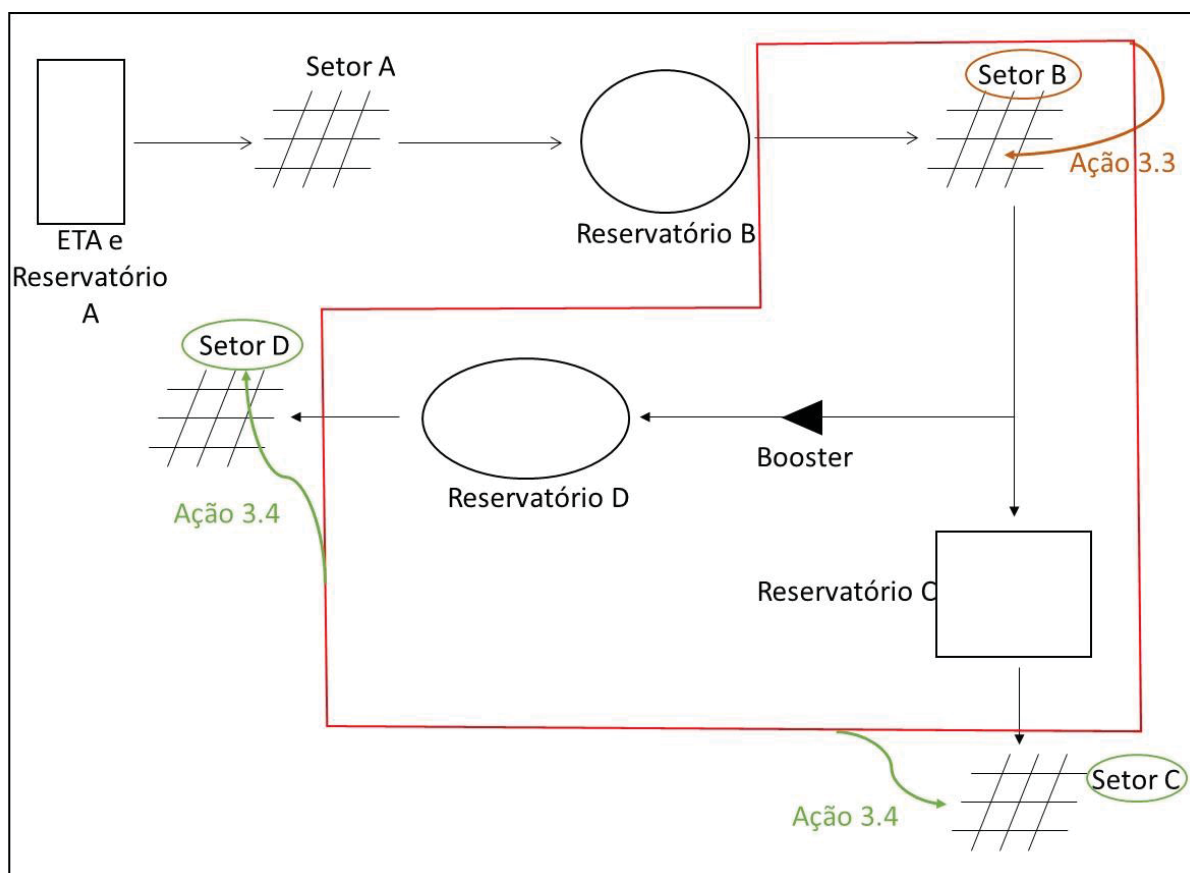
FIGURA 26 – SITUAÇÃO DO SISTEMA APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3 NO SETOR PÓS CONJUNTO DE BOMBAS 2



Como foram substituídas todas adutoras após o Conjunto de Bombas 2, a FIGURA 26 mostra que as vazões dessas adutoras aumentaram em relação às vazões do dia de maior consumo. Isso ocorre porque com o aumento do coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams há uma diminuição na perda de carga destas adutoras e consequentemente uma maior vazão é transportada.

Essa vazão transportada a mais pelas adutoras pode ter diversas finalidades. Uma delas seria o aumento da cobertura populacional no Setor B (Ação 3.3). E a outra possibilitar seria utilizá-la para aumentar a cobertura populacional nos Setores C e D (Ação 3.4). A FIGURA 27 mostra a representação esquemática dessas ações no sistema.

FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA APLICAÇÃO DAS AÇÕES 3.3 E 3.4 NO SETOR ENTRE O CONJUNTO DE BOMBAS 2 ATÉ OS SETORES C E D



São apresentadas a seguir essas duas ações e seus resultados.

Ação 3.3: Substituição das adutoras após Conjunto de Bombas 2 com o objetivo de aumentar a cobertura populacional do Setor B.

Nessa ação o principal objetivo é utilizar o volume de água transportado a mais pelas adutoras para aumentar a cobertura populacional no Setor B.

Os resultados dos critérios desta ação são apresentados na seguinte TABELA 33.

TABELA 33 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.3 NO SETOR PÓS CONJUNTO DE BOMBAS 2

Critérios	Resultados
Cobertura populacional	124,51%
Vazão captada	112,91%
Consumo de energia	108,61%
Custo de implantação	R\$ 276.000,00/km

Com a TABELA 33 nota-se que houve aumento da cobertura populacional no Setor B para 124,51%, representando o abastecimento de 2645 habitantes a mais nesse setor. Já, como ocorreu um aumento na vazão transportada pelas adutoras, os critérios vazão captada e consumo de energia também apresentaram aumento, a vazão captada aumentou para 112,91% e o consumo de energia 108,61%. E, com relação ao critério custo de implantação considerou-se R\$ 276.000,00 por quilômetro (km) de tubulação substituída.

Ação 3.4: Substituição das adutoras após o Conjunto de Bombas 2 com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setores C e D

Com a aplicação dessa ação visa-se o aumento da cobertura populacional nos Setores C e D utilizando a vazão a mais que está sendo transportada pelas adutoras no setor.

A seguir são apresentados os resultados dos critérios dessa ação na TABELA 34.

TABELA 34 – RESULTADOS DOS CRITÉRIOS SELECIONADOS APÓS APLICAÇÃO DA AÇÃO 3.4 NO SETOR PÓS CONJUNTO DE BOMBAS 2

Critérios	Resultados
Cobertura populacional no Setor C	183,52%
Cobertura populacional no Setor D	134,03%
Vazão captada	112,91%
Consumo de energia	108,61%
Custo de implantação	R\$ 276.000,00/km

A TABELA 34 mostra que houve aumento da cobertura populacional nos dois setores. No Setor C a cobertura populacional aumentou para 183,52%, correspondendo ao abastecimento de 935 habitantes a mais nesse setor. E, no Setor D o aumento foi de 134,03%, o que representa 566 pessoas a mais recebendo água. Ainda, com relação aos critérios vazão captada e consumo de energia também ocorreram acréscimos, a vazão captada ficou em 112,91% em relação ao dia de maior consumo e o consumo de energia ficou em 108,61%. Por fim, para o custo de implantação ficou em R\$ 276.000,00 por quilômetro (km) de tubulação substituída, como já explicado anteriormente.

5.5.5 Sumarização das ações de eficiência hidroenergética

Como apresentado nas simulações, cada uma das ações de eficiência hidroenergética apresentou resultados diferentes para os diversos critérios nos diferentes setores do sistema.

Nesse tópico são mostrados a sumarização das ações, apresentadas no QUADRO 5, em cada setor do sistema.

5.5.5.1 Setor A

As ações de eficiência hidroenergética que tiveram consequências diretas no Setor A foram as ações 1.1 (detecção e correção de vazamentos no setor A para aumentar a cobertura populacional no próprio setor, 1.4 (detecção e correção de vazamentos no setor B para aumentar a cobertura populacional nos setores A, C e D) e 3.1 (substituição das adutoras antigas por novas entre a captação na ETA e Reservatório A e o Reservatório B para aumentar a cobertura populacional no setor A). A seguir a TABELA 35 apresenta os resultados dessas ações no setor.

TABELA 35 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIA DIRETA NO SETOR A

	Ação 1.1	Ação 1.4	Ação 3.1
Cobertura populacional	121,91%	107,35%	110,85%
Vazão captada	100%	86,17%	107,63%
Consumo de energia	100%	90,33%	105,09%
Custo de implantação	R\$ 979,00/km	R\$ 979,00/km	R\$ 276.000,00/km

De acordo com a TABELA 35, nota-se que com relação à cobertura populacional a ação 1.1 aumentou para 121,91% a cobertura do setor, seguido da ação 3.1 e, por fim, da ação 1.4. Já, com relação aos critérios vazão captada e consumo de energia a ação que teve menor vazão captada e menor consumo de energia em relação ao dia de maior consumo foi a ação 1.4. Já, a ação 1.1 manteve-se com esses dois critérios iguais aos do dia de maior consumo enquanto a ação 3.1 teve aumento da vazão bombeada e do consumo de energia. Por fim, nesse setor as ações 1.1 e 1.4 apresentaram menor custo de implantação, sendo este no valor de R\$ 979,00/km e, a ação 3.1 apresentou um custo de implantação muito maior, no valor de R\$ 276.000,00/km.

5.5.5.2 Setor B

Para o Setor B, as ações de eficiência hidroenergética que influenciaram diretamente esse setor foram as ações 1.2 (detecção e correção de vazamentos no setor A para aumentar a cobertura populacional do setor B), 1.3 (detecção e correção de vazamentos no setor B para aumentar a cobertura populacional no próprio setor), 2.2 (uso racional da água no setor C para aumentar a cobertura populacional do setor B), 2.4 (uso racional da água no setor D para aumentar a cobertura populacional no setor B), 3.2 (substituição das adutoras antigas por novas entre a captação na ETA e Reservatório A e o Reservatório B para aumentar a cobertura populacional do setor B) e 3.3 (substituição das adutoras antigas por novas após o Conjunto de Bombas 2 para aumentar a cobertura populacional no setor B). Na TABELA 36 seguinte são mostrados os resultados dessas ações para o setor.

TABELA 36 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIA DIRETA NO SETOR B

	Ação 1.2	Ação 1.3	Ação 2.2	Ação 2.4	Ação 3.2	Ação 3.3
Cobertura populacional	143,10%	154,45%	107,70%	103,75%	143,36%	124,51%
Vazão captada	94,63%	100%	100%	100%	107,63%	112,91%
Consumo de energia	95,91%	100%	100%	100%	105,09%	108,61%
Custo de implantação	R\$ 979,00/km	R\$ 979,00/km	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 276.000,00/km	R\$ 276.000,00/km

Com o auxílio da TABELA 36, nota-se que a ação 1.3 é a que apresenta melhor resultado em relação à cobertura populacional para o setor, 154,45%; em seguida aparecem as ações 3.2, 1.2, 3.3, 2.2 e 2.4. Já com relação à vazão bombeada e ao consumo de energia as ações 1.3, 2.2 e 2.4 não tiveram alterações quando comparadas com o dia de maior consumo. Em contrapartida, a ação 1.2 apresentou redução na vazão captada para 94,63% e também no consumo de energia para 95,91%. Por fim, a ação 3.2 teve aumento na vazão captada para 107,63% e no consumo de energia para 105,09% e ação 3.3 também apresentou acréscimos em relação ao dia de maior consumo, com vazão captada aumentando para 112,91% e o consumo de energia para 108,61%. Para o último critério mostrado na tabela, custo de implantação, as ações 2.2 e 2.4 não apresentaram nenhum custo, as ações 1.3 e 1.4 apresentaram um custo de implantação de R\$ 979,00/km e, por fim, as ações 3.2 e 3.3 tiveram os maiores custos de implantação, R\$ 276.000,00/km.

5.5.5.3 Setor C

No Setor C as ações que tiveram consequências diretas foram as ações 1.4 (detecção e correção de vazamentos no setor B para aumentar a cobertura populacional nos setores A, C e D), 2.1 (uso racional da água no setor C para aumentar a cobertura populacional no próprio setor) e 3.4 (substituição das antigas adutoras por novas após o Conjunto de Bombas 2 para aumentar a cobertura populacional no setor C). Na TABELA 37 que são mostrados os resultados dessas ações no setor.

TABELA 37 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIAS DIRETAS NO SETOR C

	Ação 1.4	Ação 2.1	Ação 3.4
Cobertura populacional	126,42%	148,29%	183,52%
Vazão captada	86,12%	100%	112,91%
Consumo de energia	90,33%	100%	108,61%
Custo de implantação	R\$ 979,00/km	R\$ 0	R\$ 276.000,00/km

Observando a TABELA 37 percebe-se que a ação 3.4 possui melhor resultado em relação à cobertura populacional, 183,52%, seguido das ações 2.1 e 1.4. Em seguida, para os critérios vazão captada e consumo de energia a ação 2.1 não apresentou alteração em relação ao dia de maior consumo; já, a ação 1.4 obteve uma redução na vazão captada para 86,12% e também para o consumo de energia para 90,33%; por fim, a ação 3.4 apresentou acréscimo na vazão captada para 112,91% e no consumo de energia para 108,61%. Por último, para o custo de implantação a ação 2.1 não apresentou nenhum custo, a ação 1.4 apresentou um custo de implantação de R\$ 979,00/km e, a ação 3.4, foi a que apresentou maior custo, R\$ 276.000,00/km.

5.5.5.4 Setor D

No último setor do sistema, o Setor D, as ações 1.4 (detecção e correção de vazamentos no setor B para aumentar a cobertura populacional nos setores A, C e D), 2.3 (uso racional da água no setor D para aumentar a cobertura populacional no próprio setor) e 3.4 (substituição das adutoras antigas por novas após o Conjunto de Bombas 2 para aumentar a cobertura populacional no setor D) apresentaram consequências diretas nesse setor. Os resultados dessas ações são apresentados na TABELA 38.

TABELA 38 – RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA QUE POSSUEM CONSEQUÊNCIAS DIRETAS NO SETOR D

	Ação 1.4	Ação 2.3	Ação 3.4
Cobertura populacional	103,82%	117,70%	134,03%
Vazão captada	86,17%	100%	112,91%
Consumo de energia	90,33%	100%	108,61%
Custo de implantação	R\$ 979,00/km	R\$ 0	R\$ 276.000,00/km

Com a TABELA 38 nota-se que a ação 3.4 apresentou melhor resultado em relação à cobertura populacional, 134,03%; seguido das ações 2.3 e 1.4. Já, para os

critérios vazão captada e consumo de energia a ação 2.3 manteve esses critérios constantes; a ação 1.4 reduziu a vazão captada para 86,27% e o consumo de energia para 90,33%; e, a ação 3.4 obteve aumento em ambos os critérios, ficando a vazão captada com 112,91% e o consumo de energia, 108,61%, quando comparados com o dia de maior consumo. Por fim, para o custo de implantação a ação 2.3 não teve nenhum custo, a ação 1.4 apresentou um custo de implantação de R\$ 979,00/km e a ação 3.4 de R\$ 276.000,00/km.

5.6 HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PELO AHP

De posse, então, dos resultados das ações de eficiência hidroenergética em cada setor do sistema, nesse momento o AHP é aplicado em cada um desses setores.

A seguir são apresentadas as aplicações do AHP em cada um dos setores do sistema utilizando a TABELA 16, a qual aponta a hierarquização dos critérios selecionados pelo grupo de *stakeholders* entrevistados.

5.6.1 Setor A

No Setor A, o AHP foi aplicado nas três ações, mostradas na TABELA 35, que tiveram influência direta nesse setor a fim de verificar qual delas seria prioritária a ser executada.

Antes de iniciar a aplicação do AHP foi necessário elaborar matrizes de julgamentos, baseadas na Escala de julgamentos de Saaty apresentada no QUADRO 3, das ações de eficiência hidroenergética que tiveram influência direta no setor para cada um dos critérios abordados.

Assim, primeiramente, verificou-se como as três ações se comportaram em relação ao critério Cobertura Populacional (TABELA 35). Foi analisada a diferença percentual entre os resultados dessas ações em relação ao critério Cobertura Populacional e julgadas par a par cada uma delas em relação a essa diferença percentual de acordo com a Escala de Julgamentos de Saaty (QUADRO 3). Tendo sido considerada a ação com melhor desempenho em relação a esse critério a ação que obteve maior percentual de Cobertura Populacional. Na TABELA 39 são

apresentadas as faixas de diferenças percentuais e o valor de julgamento determinado para cada uma dessas faixas.

TABELA 39 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE AS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

Faixa de diferença percentual	Julgamento escolhido
0 – 12%	3
12,1 – 24%	5
24,1% - 48%	7
> 48%	9

De acordo com a TABELA 39, por exemplo, quando avaliada a diferença percentual entre o resultado da Ação 1.1, que foi 121,91% de cobertura populacional, com o resultado da Ação 1.4 (107,35%), chega-se a uma diferença percentual de 14,56%. Com isso, no momento do julgamento par a par entre essas duas ações, a Ação 1.1 foi considerada 5 vezes mais importante em relação à Ação 1.4, por estar na faixa de diferença percentual entre 12,1% e 24%, como é apresentado na TABELA 39. Esse processo é feito para todos os julgamentos par a par entre as três ações analisadas a fim de que seja obtida a matriz de julgamento dessas ações para o critério cobertura populacional. O resultado é mostrado na TABELA 40.

TABELA 40 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

	Ação 1.1	Ação 1.4	Ação 3.1
Ação 1.1	1	5	3
Ação 1.4	1/5	1	1/3
Ação 3.1	1/3	3	1

De acordo com a TABELA 40 a Ação 1.1 é a que possui melhor desempenho em relação ao critério cobertura populacional, tendo sido considerada forte quando comparada à Ação 1.4 e levemente forte quando comparada à Ação 3.1. Em seguida aparece a Ação 3.1 que foi considerada levemente forte quando comparada à Ação 1.4. Por fim, a ação que apresentou pior resultado em relação a este critério foi a Ação 1.4. Foi feita a análise de consistência dessa matriz e obteve-se uma razão de consistência de 3,34%, considerada aceitável de acordo com Saaty (1980), por estar abaixo de 10%.

Para o critério vazão captada foi elaborada da mesma maneira uma matriz de julgamentos das ações de eficiência hidroenergética em função desse critério.

Primeiramente, verificou-se os resultados das três ações em relação a esse critério e avaliou-se a diferença percentual entre esses resultados. Para esse critério a ação que obteve melhor desempenho foi a ação que apresentou um menor percentual de vazão captada. Na TABELA 41 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais e o julgamento escolhido de acordo com cada faixa.

TABELA 41 - FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE AS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA

Faixa de diferença percentual	Julgamento escolhido
0 – 14%	3
14,1 – 28%	5
28,1% - 42%	7
> 42%	9

Assim, de acordo com a TABELA 41, quando avaliada a diferença percentual entre a Ação 1.4 (86,17% de vazão captada) em relação à Ação 1.1 (100% de vazão captada), essa diferença percentual fica em 13,83%, tendo sido julgada, portanto, 3 vezes mais importante que a Ação 1.1. Esse processo é repetido para todos os julgamentos par a par entre as ações a fim de que seja obtida a matriz de julgamentos apresentada na TABELA 42.

TABELA 42 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA

	Ação 1.1	Ação 1.4	Ação 3.1
Ação 1.1	1	1/3	3
Ação 1.4	3	1	5
Ação 3.1	1/3	1/5	1

Observa-se na TABELA 42 que a Ação 1.4 apresenta melhor resultado em relação ao critério vazão captada, sendo considerada levemente forte em relação à Ação 1.1 e forte em relação à Ação 3.1. Depois surge a Ação 1.1 que foi considerada levemente forte quando comparada com a Ação 3.1. Por último, a Ação 3.1 foi a que apresentou pior desempenho para esse critério dentre todas. Com relação à análise de consistência dessa matriz de julgamento, a razão de consistência encontrada ficou igualmente à matriz anterior, em 3,34%.

Fez-se o mesmo processo para o critério consumo de energia. Primeiramente avaliou-se os resultados das três ações em relação a esse critério e verificou-se a diferença percentual entre esses resultados. Para esse critério a ação que obteve

menor percentual foi a de melhor desempenho. De acordo, então, com as diferenças percentuais entre os resultados das ações, determinaram-se faixas de diferenças percentuais e respectivos julgamentos que devem ser dados a cada uma das faixas. Na TABELA 43 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais determinadas e os respectivos julgamentos escolhidos para cada faixa.

TABELA 43 - FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA

Faixa de diferença percentual	Julgamento escolhido
0 – 14%	3
14,1 – 28%	5
28,1% - 42%	7
> 42%	9

Na TABELA 43, por exemplo, quando avaliada a diferença percentual entre a Ação 1.4 e a Ação 3.1 obteve uma diferença percentual de 14,76%. Como esta diferença se encontra na faixa entre 14,1 e 28%, a Ação 1.4 foi julgada como 5 vezes mais importante do que a Ação 3.1. Esse processo foi repetido para todos os julgamentos par a par das ações para que se determinasse a matriz de julgamentos desse critério em relação às ações de eficiência hidroenergética. A matriz é apresentada na TABELA 44.

TABELA 44 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA

	Ação 1.1	Ação 1.4	Ação 3.1
Ação 1.1	1	1/3	3
Ação 1.4	3	1	5
Ação 3.1	1/3	1/5	1

A Ação 1.4 apresentou melhor resultado para esse critério. Ela foi considerada levemente forte sobre a Ação 1.1 e forte sobre a Ação 3.1. Já, a Ação 1.1 apresentou-se levemente forte em relação à Ação 3.1. E, por fim, a Ação 3.1 foi a que mostrou pior desempenho em relação a esse critério. A razão de consistência encontrada para essa matriz de julgamento foi de 3,34%.

Por último, para o critério custo de implantação também foi elaborada a mesma matriz de julgamentos. Porém, primeiramente foram avaliados os resultados das ações em relação ao critério custo de implantação e a diferença entre esses resultados. Após foram determinadas as faixas de diferenças de custo e os

respectivos julgamentos de acordo com cada faixa. Para esse critério a ação que possui menor custo de implantação é a ação de melhor desempenho em relação a esse critério. Na TABELA 45 são apresentadas as faixas de diferenças de custos e os respectivos julgamentos escolhidos para cada uma das faixas.

TABELA 45 - FAIXAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO ENTRE AS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS COM CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

Faixa de custos de implantação	Julgamento escolhido
R\$ 0 – R\$ 100.000,00	3
R\$ 101.000,00 – R\$ 200.000,00	5
R\$ 201.000,00 – R\$ 300.000,00	7
> R\$ 301.000,00	9

Com o auxílio da TABELA 45, nota-se que a diferença de custo entre as Ações 1.1 e 3.1 é de R\$ 275.021,00, ficando na faixa entre R\$ 201.000,00 e R\$ 300.000,00. Sendo, então, as Ação 1.1 julgada como 7 vezes melhor que a Ação 3.1. Esse processo é repetido para todos os julgamentos par a par entre as três ações no intuito de analisar as ações de eficiência hidroenergética em relação a esse critério e determinar a matriz de julgamentoS desse critério. Essa matriz é apresentada na TABELA 46.

TABELA 46 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

	Ação 1.1	Ação 1.4	Ação 3.1
Ação 1.1	1	1	7
Ação 1.4	1	1	7
Ação 3.1	1/7	1/7	1

Nota-se que as ações 1.1 e 1.4 possuem os melhores desempenhos em relação a esse critério. Além disso, o desempenho dessas duas ações são iguais, as duas foram consideradas muito fortes (sete vez mais) em relação à Ação 3.1. Assim, com relação aos critérios, a Ação 3.1 foi a que apresentou pior resultado. Nessa matriz de julgamento a razão de consistência ficou em 0%, sendo considerada, portanto, consistente.

Com as matrizes de julgamentos de todas ações de eficiência hidroenergética em relação todos os critérios abordados foi então possível aplicar o AHP.

Aplicação do AHP ao Setor A

Nessa etapa foi feita a aplicação do AHP seguindo a hierarquização apontada pelo grupo de *stakeholders* entrevistados. Obteve-se, com isso, uma hierarquização das ações de eficiência hidroenergética para o Setor A de acordo com visão do grupo de *stakeholders*. O resultado do AHP é apresentado na TABELA 47.

TABELA 47 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR A

Ranking	Ação	Autovetor
1°	Ação 1.4 (B → A, C, D)	44%
2°	Ação 1.1 (A → A)	41%
3°	Ação 3.1 (ETA, RA, RB → A)	14%

Para o Setor A, quando o AHP foi executado, a Ação 1.4 foi a que obteve melhor resultado, seguido das Ações 1.1 e 3.1, como é mostrado na TABELA 47. Assim, é importante ressaltar que a Ação 1.4, que trata-se da detecção e correção de vazamentos, é executada no Setor B, porém possui influência diretamente no Setor A, contribuindo em 44% para o objetivo, que é escolha da ação de eficiência hidroenergética mais adequada ao sistema. Na sequência, uma outra ação que contribui em 41% para o objetivo é também a detecção e correção de vazamentos, mas agora com aplicação direta no próprio Setor A. Por último, e com um percentual bem distante das duas primeiras ações hierarquizadas, aparece a ação 3.1, que tem o intuito de substituir as adutoras do setor entre a captação na ETA e Reservatório A até o Reservatório B, contribuindo em 14% para o objetivo. Essa ação aparece bastante distante das outras principalmente devido ao seu alto custo. As outras duas ações ficam nos primeiros lugares porque ambas possuem resultados bastante positivos em relação à cobertura populacional e à vazão captada.

5.6.2 Setor B

Aqui cada uma das ações mostradas na TABELA 36 que tiveram influência direta nesse setor passaram primeiramente por um julgamento em relação aos critérios adotados, de acordo com a Escala de julgamentos elaborada por Saaty e apresentada no QUADRO 3, da mesma forma que foi apresentado para o Setor A.

Assim, primeiramente, verificou-se como as ações se comportaram em relação ao critério cobertura populacional (TABELA 48). Foi analisada a diferença percentual entre os resultados das ações em relação a esse critério e julgada par a par cada uma dessas ações em relação a essa diferença percentual de acordo com a Escala de Julgamentos de Saaty (QUADRO 3). Tendo sido considerada a ação com melhor desempenho em relação a esse critério a ação que obteve maior percentual de cobertura populacional. Na TABELA 48 são apresentadas as diferenças percentuais entre os resultados das ações para esse critério e o valor de julgamento entre elas.

TABELA 48 - FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES COM OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

Faixas de diferenças percentuais	Julgamento escolhido
0 – 15%	3
15,1 – 30%	5
30,1 – 51%	7
> 51%	9

Com o auxílio da TABELA 48, foi possível então julgar par a par as ações de eficiência hidroenergética para o critério cobertura populacional verificando a diferença percentual existente entre os resultados dessas ações. Por exemplo, a Ação 1.3, com 154,45% de cobertura populacional, quando comparada à Ação 1.2, que obteve cobertura populacional de 143,10%, possui uma diferença percentual entre os resultados de 11,35%. Observando a TABELA 48, essa diferença fica na primeira faixa e quando feito o julgamento par a par entre essas ações é determinado que a Ação 1.2 é 3 vezes mais importante que a Ação 1.3 em relação ao critério cobertura populacional. Esse procedimento é repetido para todos os julgamentos par a par entre os resultados das ações e é, então, determinada a matriz de julgamentos apresentada na TABELA 49.

TABELA 49 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

	Ação 1.2	Ação 1.3	Ação 2.2	Ação 2.4	Ação 3.2	Ação 3.3
Ação 1.2	1	1/3	7	7	1	5
Ação 1.3	3	1	7	7	3	5
Ação 2.2	1/7	1/7	1	1	1/7	1/5
Ação 2.4	1/7	1/7	1	1	1/7	1/5
Ação 3.2	1	1/3	7	7	1	5
Ação 3.3	1/5	1/5	5	5	1/5	1

Com relação ao critério Cobertura Populacional a ação que apresenta melhor desempenho, como mostrado na TABELA 49, é a Ação 1.3 que foi considerada levemente forte sobre a Ação 1.2 e 3.2, forte quando comparada à Ação 3.3 e muito forte em relação às Ações 2.2 e 2.4. Em seguida aparecem as Ações 1.2 e 3.2 com desempenhos iguais. Depois vem a Ação 3.3 e, por último, a Ação 2.2 com pior desempenho dentre todas. A razão de consistência dessa matriz de julgamentos ficou em 7,65%, estando dentro do aceitável, de acordo com Saaty (1980).

Em seguida foi feita a mesma matriz de julgamentos agora com relação ao critério vazão captada. Primeiramente, verificou-se os resultados das ações em relação a esse critério e avaliou-se a diferença percentual entre esses resultados. Para esse critério a ação que obteve melhor desempenho foi a ação que apresentou um menor percentual de vazão captada. Na TABELA 50 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais e os julgamentos escolhidos de acordo com cada faixa.

TABELA 50 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA

Faixa de diferença percentual	Julgamento escolhido
1 – 12,9%	3
13 – 26%	5
26,1 – 50%	7
> 50%	9

Observando a TABELA 50, portanto, é possível julgar as ações par a par. Por exemplo, a Ação 1.2 apresentou 94,63% de vazão captada, quando se compara essa ação à Ação 3.3, que apresentou um percentual de 112,91%, a diferença percentual entre as duas fica em 18,28%, ficando na segunda faixa da TABELA 50 e, portanto, sendo determinada que a Ação 1.2 é 5 vezes mais importante que a Ação 3.3. Esse processo é repetido para todos os outros julgamentos a fim de montar a matriz de julgamentos dessas ações em relação ao critério vazão captada, mostrada na TABELA 51.

TABELA 51 – MATRIZ DE JULGAMENTO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO BOMBEADA

	Ação 1.2	Ação 1.3	Ação 2.2	Ação 2.4	Ação 3.2	Ação 3.3
Ação 1.2	1	3	3	3	5	5
Ação 1.3	1/3	1	1	1	3	3
Ação 2.2	1/3	1	1	1	3	3
Ação 2.4	1/3	1	1	1	3	3
Ação 3.2	1/5	1/3	1/3	1/3	1	3
Ação 3.3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1

Como é apresentado na TABELA 51, a Ação 1.2 é a que apresenta melhor resultado com relação ao critério vazão captada, sendo levemente forte quando comparada às Ações 1.3, 2.2 e 2.4 e forte quando comparada às Ações 3.2 e 3.3. Na sequência aparecem as Ações 1.3, 2.2 e 2.4 com desempenhos iguais e levemente fortes em relação às Ações 3.2 e 3.3. Depois surge a Ação 3.2 e, por fim, a Ação 3.3 que apresenta pior desempenho dentre todas as outras. Para essa matriz foi encontrada a razão de consistência de 3,32%.

Para o critério consumo de energia as ações de eficiência hidroenergética que tiveram influência direta também foram julgadas. Primeiramente, verificou-se os resultados das ações em relação a esse critério e avaliou-se a diferença percentual entre esses resultados. Para esse critério a ação que obteve melhor desempenho foi a ação que apresentou um menor percentual de consumo de energia. Na TABELA 52 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais entre os resultados das ações e o julgamento escolhido de acordo com cada faixa.

TABELA 52 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DESSAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA

Faixa de diferença percentual	Julgamento escolhido
1 – 12,9%	3
13 – 26%	5
26,1 – 50%	7
> 50%	9

Com a TABELA 52, portanto, faz-se o julgamento par a par entre as ações de eficiência hidroenergética que possuem influência nesse setor. Por exemplo, a Ação 1.2 que apresentou 95,91% de consumo de energia quando comparada à Ação 1.3, com 100% de vazão captada, apresenta uma diferença percentual de 5,01%, ficando segunda faixa mostrada na TABELA 52, sendo assim, a Ação 1.2 é considerada 3 vezes mais importante que a Ação 1.3. Esse processo é repetido para

os todos os julgamentos par a par entre os resultados das ações que influenciam esse setor para que seja determinada a matriz de julgamentos dessas ações em relação ao critério vazão captada, apresentada na TABELA 53.

TABELA 53 – MATRIZ DE JULGAMENTOS PAR A PAR DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA

	Ação 1.2	Ação 1.3	Ação 2.2	Ação 2.4	Ação 3.2	Ação 3.3
Ação 1.2	1	3	3	3	5	5
Ação 1.3	1/3	1	1	1	3	3
Ação 2.2	1/3	1	1	1	3	3
Ação 2.4	1/3	1	1	1	3	3
Ação 3.2	1/5	1/3	1/3	1/3	1	3
Ação 3.3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1

A matriz de julgamentos apresentada na TABELA 53 é igual àquela apresentada para o critério vazão captada, pois as ações de eficiência hidroenergética apresentam praticamente o mesmo desempenho para esses dois critérios. Tendo sido encontrada a mesma razão de consistência, 3,32%

Por fim, fez-se, também, uma matriz de julgamentos das ações de eficiência hidroenergética que possuem influência no setor para o critério custo de implantação. Primeiramente, verificaram-se os resultados das ações em relação a esse critério e avaliou-se as diferenças de custo de implantação entre esses resultados. Para esse critério a ação que obteve melhor desempenho foi a ação que apresentou um menor custo de implantação. Na TABELA 54 são apresentadas as faixas de diferenças de custos de implantação entre as ações e o julgamento escolhido de acordo com cada faixa.

TABELA 54 – FAIXAS DE DIFERENÇAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO ENTRE AS AÇÕES COM OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

Faixa de diferenças de custo de implantação	Julgamento escolhido
R\$ 0 – R\$ 100.000,00	3
R\$ 101.000,00 – R\$ 200.000,00	5
R\$ 201.000,00 – R\$ 300.000,00	7
> R\$ 301.000,00	9

Assim, pode-se fazer o julgamento par a par dos resultados ações. Tendo, por exemplo, a Ação 3.2 um custo de implantação de R\$ 276.000,00/km e a Ação 1.2, R\$ 979,00/km, a diferença de custos entre elas é de R\$ 275.021,00, ficando na terceira faixa e sendo julgada a Ação 1.2 três vezes melhor do que a Ação 3.2. Esse

processo é repetido para todos os julgamentos par a par a fim de se determinar a matriz de julgamentos para esse critério, sendo apresentada na TABELA 55.

TABELA 55 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

	Ação 1.2	Ação 1.3	Ação 2.2	Ação 2.4	Ação 3.2	Ação 3.3
Ação 1.2	1	1	1/5	1/5	7	7
Ação 1.3	1	1	1/5	1/5	7	7
Ação 2.2	5	5	1	1	9	9
Ação 2.4	5	5	1	1	9	9
Ação 3.2	1/7	1/7	1/9	1/9	1	3
Ação 3.3	1/7	1/7	1/9	1/9	1/3	1

Na TABELA 55 as Ações 2.2 e 2.4 são as que apresentaram melhores resultado em relação ao critério custo de implantação, sendo consideradas fortes em relação às Ações 1.2 e 1.3 e extremamente fortes em relação às Ações 3.2 e 3.3. Em seguida estão as Ações 1.2 e 1.3 tendo sido consideradas fortes em relação às Ações 3.2 e 3.3. Depois aparece a Ação 3.2 julgada como levemente forte sobre a Ação 3.3. E, por último, a Ação 3.3 que apresenta pior desempenho quando comparada com todas as outras ações. A razão de consistência para essa matriz ficou em 9,71%.

Aplicação do AHP ao Setor B

O resultado da hierarquização para o Setor B é apresentado na TABELA 56.

TABELA 56 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR B

Ranking	Ação	Autovetor
1°	Ação 1.2 (A → B)	29%
2°	Ação 1.3 (B → B)	22%
3°	Ação 2.2 (C → B)	16%
4°	Ação 2.4 (D → B)	16%
5°	Ação 3.2 (ETA, RA, RB → B)	11%
6°	Ação 3.3 (RB, C, D → B)	6%

De acordo com a hierarquização apresentada na TABELA 56, a Ação 1.2 foi a que apresentou melhor resultado em relação ao objetivo, ficando com 29%. Com essa ação é feita a detecção e correção de vazamentos no Setor A, tendo influência direta no Setor B. Na sequência apareceu a Ação 1.3, com 22%, sendo também a detecção e correção de vazamentos, mas agora no próprio Setor B. Nos terceiro e

quarto lugares estão as ações de uso racional da água, sendo a Ação 2.2 aplicada no Setor C e a ação 2.4 no Setor D, ambas contribuem 16% para o objetivo final. Por fim, surgem as ações de substituição das adutoras, em que a Ação 3.1, contribuindo com 11%, trata-se da substituição das adutoras após a captação na ETA e Reservatório A até o Reservatório B e a Ação 3.3, contribuindo com 6%, é a substituição das adutoras após o Conjunto de Bombas 2 até os Setores C e D. Conclui-se, portanto, que as ações de detecção e correção de vazamentos são as mais interessantes de serem aplicadas por contribuírem fortemente para os critérios vazão captada e cobertura populacional, sendo estes os critérios mais importantes apontados pelos *stakeholders* entrevistados no momento da definição de qual ação de eficiência hidroenergética ser executada. Já as ações que envolvem a substituição das adutoras ficaram nas últimas colocações por apresentaram maiores consumos de energia e custos de implantação, critérios estes considerados menos importantes na escolha da ação de eficiência hidroenergética.

5.6.3 Setor C

Para o Setor C três ações de eficiência hidroenergética têm influência direta sobre o setor, assim, o AHP foi aplicado nessas ações.

Antes da execução do AHP, porém, todas as ações foram julgadas para cada um dos critérios selecionados de acordo com a Escala de julgamentos elaborada por Saaty e apresentada no QUADRO 3.

Primeiramente, as ações de eficiência hidroenergética foram julgadas em relação ao critério cobertura populacional. Para esse julgamento foram verificados os resultados das ações de eficiência hidroenergética que influenciam o setor e avaliada as diferenças percentuais entre esses resultados. Para esse critério, a ação com melhor desempenho é aquela que apresenta um maior percentual de cobertura populacional. Foram, com isso, determinadas faixas de diferenças percentuais e os respectivos julgamentos para cada uma das faixas de acordo com o QUADRO 3. Na TABELA 57 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais e seus respectivos julgamentos.

TABELA 57 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS PARA CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

Faixas de diferenças percentuais	Julgamentos escolhidos
10 – 25%	3
25,1 – 50%	5
50,1 – 75%	7
> 75%	9

Assim, com o auxílio da TABELA 57 é possível julgar os resultados das ações par a par. Por exemplo, a Ação 2.1 apresentou cobertura populacional de 148,29% e a Ação 1.4, 126,42%, a diferença percentual entre elas é de 21,87%, ficando na primeira faixa da TABELA 57. Portanto, a Ação 2.1 foi julgada como três vezes melhor do que a Ação 1.4. Esse processo foi repetido para um dos julgamentos par a par entre as ações a fim de obter a matriz de julgamentos para o critério cobertura populacional, mostrada na TABELA 58.

TABELA 58 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

	Ação 1.4	Ação 2.1	Ação 3.4
Ação 1.4	1	1/3	1/7
Ação 2.1	3	1	1/5
Ação 3.4	7	5	1

Para o critério cobertura populacional a Ação 3.4 é a que apresenta melhor resultado, como mostra a TABELA 58, sendo considerada muito forte em relação à Ação 1.4 e forte em relação à Ação 2.1. Em seguida aparece a Ação 2.1 que é levemente forte sobre a Ação 1.4. Por fim, a ação com pior resultado em relação à Cobertura Populacional é a 1.4. Foi realizado o cálculo para determinar a razão de consistência dessa matriz, tendo sido encontrado o valor de 5,67%.

O mesmo julgamento das ações de eficiência hidroenergética foi realizado para o critério vazão captada. Em um primeiro momento, verificaram-se os resultados das ações para o critério vazão captada. Após, foram avaliadas as diferenças percentuais entre esses resultados e para que o julgamento fosse feito foram determinadas faixas de diferenças percentuais entre esses resultados e os respectivos julgamentos definidos para cada uma das faixas. Sendo que para esse critério a ação com melhor desempenho é ação que apresentar menor percentual vazão captada. Na TABELA 59 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais e seus respectivos julgamentos.

TABELA 59 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA

Faixas de diferenças percentuais	Julgamentos escolhidos
10 – 25%	3
25,1 – 50%	5
50,1 – 75%	7
> 75%	9

Com TABELA 59, portanto, foi possível julgar cada uma das ações par a par. Como exemplo, tem-se a Ação 3.4, que apresentou 112,91% de vazão captada e a Ação 1.4, com 86,12% de vazão captada, a diferença percentual entre elas é de 26,79%, ficando na segunda faixa apresentada na TABELA 59 e, portanto, a Ação 1.4 foi julgada como cinco vezes melhor do que a Ação 3.4. Esse processo foi repetido para todos os julgamentos par a par entre as ações a fim de que fosse determinada a matriz de julgamentos para o critério vazão captada, apresentada na TABELA 60.

TABELA 60 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO BOMBEADA

	Ação 1.4	Ação 2.1	Ação 3.4
Ação 1.4	1	3	5
Ação 2.1	1/3	1	3
Ação 3.4	1/5	1/3	1

Com o auxílio da TABELA 60, nota-se que a Ação 1.4 possui melhor desempenho em relação ao critério vazão captada, sendo levemente forte quando comparada à Ação 2.1 e forte quando comparada à Ação 3.4. Na sequência está a Ação 2.1 tendo sido considerada levemente forte em relação à Ação 3.4. Por fim, com pior desempenho neste critério surge a Ação 3.4. Com a análise de consistência elaborada, obteve-se uma razão de consistência de 3,34% para essa matriz.

Para o critério consumo de energia, primeiramente os resultados das ações foram julgados par a par. Para isso foram verificados os resultados das ações em relação ao critério consumo de energia e avaliados as diferenças percentuais entre eles. Para que o julgamento fosse feito foram determinadas faixas de diferenças percentuais entre esses resultados e seus respectivos julgamentos foram definidos. Para esse critério a ação que possui melhor desempenho é aquela que apresenta menor percentual de consumo de energia. Na TABELA 61 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais e seus respectivos julgamentos determinados.

TABELA 61 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA

Faixas de diferenças percentuais	Julgamentos escolhidos
5 – 15%	3
15,1 – 30%	5
30,1 – 55%	7
> 55%	9

Com a TABELA 61 é possível julgar os resultados das ações par a par. Assim, a Ação 2.1, que apresentou 100% de consumo de energia, quando comparada com a Ação 1.4, com 90,33% de consumo de energia, apresenta uma diferença percentual de 9,67%, ficando na primeira faixa da tabela. Com isso, a Ação 1.4 foi julgada como três vezes melhor do que a Ação 1.4. Esse processo foi repetido para todos os outros julgamentos par a par a fim de que fosse determinada a matriz de julgamentos para o critério consumo de energia, como é apresentada na TABELA 62.

TABELA 62 – MATRIZ DE JULGAMENTO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA

	Ação 1.4	Ação 2.1	Ação 3.4
Ação 1.4	1	3	5
Ação 2.1	1/3	1	3
Ação 3.4	1/5	1/3	1

Como observado na TABELA 62, a Ação 1.4 é a que possui melhor desempenho para esse critério, sendo considerada levemente forte sobre a Ação 2.1 e forte sobre a Ação 3.4. Em seguida aparece a Ação 2.1 considerada levemente forte sobre a Ação 3.4. Por fim, a Ação 3.4 é a de pior desempenho para esse critério. A razão de consistência dessa matriz foi de 3,34%.

Para o último critério selecionado, custo de implantação, também foi elaborada a matriz de julgamento das ações. Primeiramente foram verificados os custos de implantação para cada uma das ações e avaliadas as diferenças entre esses custos. Após, foram determinadas faixas de diferenças de custos de implantação entre ações e para cada uma dessas faixas foi definido um determinado julgamento de acordo com o QUADRO 3. Essas faixas de diferenças de custos de implantação entre as ações e seus respectivos julgamentos são apresentados na TABELA 63.

TABELA 63 – FAIXAS DE DIFERENÇAS DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

Faixa de diferenças de custos de implantação	Julgamento escolhido
R\$ 0 – R\$ 100.000,00	3
R\$ 101.000,00 – R\$ 200.000,00	5
R\$ 201.000,00 – R\$ 300.000,00	7
> R\$ 301.000,00	9

Com a TABELA 63 é possível, então, fazer o julgamento par a par entre os custos de implantação das ações. Por exemplo, a Ação 1.4 com custo de implantação de R\$ 979,00/km quando comparada à Ação 2.1 que apresenta custo de implantação de R\$ 0,00/km, apresenta uma diferença de custos de R\$ 979,00, ficando na primeira faixa da TABELA 63. Assim, a Ação 2.1 foi considerada três vezes melhor do que a Ação 1.4. Esse processo foi repetido para todos os julgamentos par a par para que fosse determinada a matriz de julgamentos para o critério custo de implantação. Essa matriz é apresentada na seguinte TABELA 64.

TABELA 64 – MATRIZ DE JULGAMENTO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

	Ação 1.4	Ação 2.1	Ação 3.4
Ação 1.4	1	1/3	7
Ação 2.1	3	1	9
Ação 3.4	1/7	1/9	1

Para esse critério, a Ação 2.1 é a que possui melhor desempenho, tendo sido considerada levemente forte quando comparada à Ação 1.4 e extremamente forte quando comparada à Ação 3.4, como é mostrado na TABELA 64. Em seguida está a Ação 1.4 que foi considerada muito forte quando comparada à Ação 3.4. Por fim, está a Ação 3.4 com pior desempenho dentre todas em relação a esse critério. Foi encontrada para essa matriz uma razão de consistência de 7,01%.

Aplicação do AHP ao Setor C

O resultado da hierarquização das ações de eficiência hidroenergética que possuem influência no setor é dado na TABELA 65.

TABELA 65 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR C

Ranking	Ação	Autovetor
1º	Ação 1.4 (B → A, C, D)	40%
2º	Ação 2.1 (C → C)	32%
3º	Ação 3.4 (RB, C, D → C, D)	28%

Como observa-se na TABELA 65, a ação que possui melhor resultado para o Setor C, é a Ação 1.4, contribuindo com 40% para o objetivo final. Essa ação trata-se da detecção e correção de vazamentos no Setor B, tendo influência direta no Setor C. Em seguida aparece a Ação 2.1, uso racional da água no próprio Setor C, com 32%. E, por último, mas com pontuação próxima à do segundo lugar, está a Ação 3.4, substituição das adutoras no setor após o Conjunto de Bombas 2 até os Setores C e D. Vale ressaltar que para esse setor não houve uma diferença muito discrepantes nos resultados das três ações avaliadas, principalmente entre as duas últimas colocadas. Nessa hierarquização, a Ação 3.4 continua sendo a menos preferível, porém não há uma discrepância tão grande desta em relação às outras ações como visto nas outras hierarquizações apresentadas.

5.6.4 Setor D

Assim como em todos os outros setores, as ações de eficiência hidroenergética que possuem influência direta no Setor D serão hierarquizadas pelo AHP. Antes disso, porém, as ações são analisadas para cada um dos critérios selecionados de acordo com a Escala de julgamentos proposta por Saaty e apresentada no QUADRO 3.

Para o primeiro critério, cobertura populacional, as ações de eficiência hidroenergética são julgadas. Primeiramente foram verificados os resultados das ações para esse critério e avaliadas as diferenças percentuais entre esses resultados. Para o critério cobertura populacional, a ação que possui melhor desempenho é aquela que apresenta maior percentual de cobertura populacional. Após isso, foram determinadas faixas de diferenças percentuais entre os resultados das ações e foram definidos os julgamentos determinados de acordo com o QUADRO 3. Na TABELA 66 são apresentadas as faixas de diferenças percentuais entre os resultados das ações e seus respectivos julgamentos.

TABELA 66 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

Faixas de diferenças percentuais	Julgamentos escolhidos
5 – 30%	3
30,1 – 55%	5
55,1 – 80%	7
> 55%	9

Com o auxílio da TABELA 66 os julgamentos par a par podem ser executados. Como, por exemplo, a Ação 2.3, com 117,7% de cobertura populacional, quando comparada à Ação 1.4, com 103,82%, possui uma diferença percentual de 16,33%, ficando na primeira faixa da TABELA 66. Assim, a Ação 2.3 foi julgada com um desempenho três vezes melhor do que a Ação 1.4. Esse processo foi repetido para cada um dos julgamentos par a par entre as ações e o resultado é apresentado na matriz de julgamento da TABELA 67.

TABELA 67 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO COBERTURA POPULACIONAL

	Ação 1.4	Ação 2.3	Ação 3.4
Ação 1.4	1	1/3	1/5
Ação 2.3	3	1	1/3
Ação 3.4	5	3	1

Com a TABELA 67, nota-se que a Ação 3.4 foi julgada mais importante dentre as outras, tendo sido considerada forte em relação à Ação 1.4 e levemente forte em relação à Ação 2.3. Depois vem a Ação 2.3 que foi julgada levemente importante quando comparada à Ação 1.4. Por fim, a Ação 1.4 é a de pior desempenho em relação ao critério Cobertura Populacional quando comparada com as outras duas ações. A razão de consistência encontrada para essa matriz foi de 3,34%.

Em seguida foi feito o mesmo julgamento das ações de eficiência hidroenergética que influenciam setor agora para o critério vazão captada. Verificaram-se os resultados das ações para esse critério e foram avaliadas as diferenças percentuais entre esses resultados. Para esse critério a ação com melhor desempenho é aquela que possui menor percentual de vazão captada. Foram determinadas, após, novas faixas de diferenças percentuais entre os resultados das ações e foram definidos os julgamentos para cada uma das faixas de acordo com o QUADRO 3. A TABELA 68 mostra essas faixas de diferenças percentuais definidas e seus respectivos julgamentos.

TABELA 68 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA

Faixas de diferenças percentuais	Julgamentos escolhidos
5 – 13%	3
13,1 – 25%	5
25,1 – 50%	7
> 50,1%	9

Com a TABELA 68 é possível julgar par a par os resultados das ações em relação ao critério vazão captada. Assim, a Ação 1.4, com 86,17% de vazão captada, quando comparada à Ação 3.4, com 112,91%, apresenta uma diferença percentual de 26,74%, ficando na terceira faixa da TABELA 68 e tendo sido considerada como sete vezes melhor do que a Ação 3.4. Esse processo foi repetido para todos os julgamentos par a par entre as ações e resultou na matriz de julgamentos para o critério vazão captada, apresentada na TABELA 69.

TABELA 69 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO VAZÃO CAPTADA

	Ação 1.4	Ação 2.3	Ação 3.4
Ação 1.4	1	5	7
Ação 2.3	1/5	1	3
Ação 3.4	1/7	1/3	1

Nesse caso, de acordo com TABELA 69, a Ação 1.4 foi considerada a mais importante dentre as três ações julgadas, sendo considerada forte em relação à Ação 2.3 e muito forte em relação à Ação 3.4. Depois vem a Ação 3.4 considerada levemente forte quando comparada à Ação 3.4. Por fim, a Ação 3.4 foi julgada a menos importante quando comparada às outras duas ações. Nessa matriz de julgamento, a razão de consistência ficou em 5,67%.

Na sequência para o critério consumo de energia, as ações de eficiência hidroenergética foram julgadas a fim de verificar seus comportamentos em relação a esse critério. Novamente, foram verificados os resultados das ações em relação a esse critério e foram avaliadas as diferenças percentuais entre esses resultados. A partir disso, determinaram-se faixas de diferenças percentuais entre os resultados dessas ações e foram definidos os julgamentos para cada uma das faixas de acordo com o QUADRO 3. A TABELA 70 apresenta essas faixas de diferenças percentuais e os respectivos julgamentos.

TABELA 70 – FAIXAS DE DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE OS RESULTADOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA

Faixas de diferenças percentuais	Julgamentos escolhidos
5 – 13%	3
15,1 – 30%	5
30,1 – 55%	7
> 55%	9

O julgamento par a par entre os resultados das ações foi realizado de acordo com a TABELA 70. Por exemplo, a Ação 2.3, com 100% de consumo de energia, quando comparada à Ação 3.4, com 108,61% de consumo de energia, apresenta uma diferença percentual de 8,61%, ficando na primeira faixa da TABELA 70. Com isso, a Ação 2.3 foi julgada como três vezes melhor do que a Ação 3.4. Esse processo foi repetido para todos os julgamentos par a par entre as ações e resultou na matriz de julgamento, apresentada na TABELA 71.

TABELA 71 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CONSUMO DE ENERGIA

	Ação 1.4	Ação 2.3	Ação 3.4
Ação 1.4	1	5	7
Ação 2.3	1/5	1	3
Ação 3.4	1/7	1/3	1

Com o auxílio da TABELA 71 nota-se que a Ação 1.4 foi considerada mais importante para esse critério, sendo considerada forte sobre a Ação 2.3 e muito forte sobre a Ação 3.4. Em seguida surge a Ação 2.3 que foi considerada levemente forte quando comparada à Ação 3.4. Por último, a ação considerada menos importante dentre as três foi a Ação 3.4. A razão de consistência ficou em 3,34% para essa matriz.

Por fim, para o último critério, Custo de Implantação foi feito o mesmo julgamento das ações agora com relação a esse critério. Foram definidas faixas de diferenças de custo de implantação entre as ações e determinados os julgamentos para cada uma das faixas de acordo com o QUADRO 3.

TABELA 72 – FAIXAS DE DIFERENÇAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E OS JULGAMENTOS ASSOCIADOS A CADA UMA DAS FAIXAS PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

Faixa de diferenças de custos de implantação	Julgamento escolhido
R\$ 0 – R\$ 100.000,00	3
R\$ 101.000,00 – R\$ 200.000,00	5
R\$ 201.000,00 – R\$ 300.000,00	7
> R\$ 301.000,00	9

Com a TABELA 72, portanto, foi possível julgar os custos de implantação par a par entre as ações. Sendo, determinada com isso a matriz de julgamentos do critério custo de implantação, apresentada na TABELA 73.

TABELA 73 – MATRIZ DE JULGAMENTOS DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA PARA O CRITÉRIO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

	Ação 1.4	Ação 2.3	Ação 3.4
Ação 1.4	1	1/3	5
Ação 2.3	3	1	9
Ação 3.4	1/5	1/9	1

Para esse critério, a Ação 2.3 foi julgada mais importante, como mostrado na TABELA 73, tendo sido considerada levemente forte em relação à Ação 1.4 e extremamente forte em relação à Ação 3.4. Depois vem a Ação 3.4 considerada forte quando comparada à Ação 3.4. Em último lugar, está a Ação 3.4 considerada menos importante em relação a esse critério. Foi uma encontrada para essa matriz de julgamento uma razão de consistência de 2,52%.

Aplicação do AHP ao Setor D

Nessa aplicação do AHP foi feita a hierarquização das ações de eficiência hidroenergética. O resultado dessa hierarquização é apresentada na TABELA 74.

TABELA 74 – HIERARQUIZAÇÃO DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA 1ª APLICAÇÃO DO AHP PARA O SETOR D

Ranking	Ação	Autovetor
1°	Ação 1.4 (B → A, C, D)	43%
2°	Ação 2.3 (D → D)	32%
3°	Ação 3.4 (RB, C, D → D)	25%

Nessa hierarquização, de acordo com a TABELA 74, a ação que apresenta melhor resultado é Ação 1.4, que é a detecção e correção de vazamentos no Setor B

e possui influência direta no Setor D, contribuindo com 43% para o objetivo final. Na sequência está a Ação 2.3 (uso racional da água no próprio setor), com 32%. E, por fim, surge a Ação 3.4, substituição das adutoras no setor após o Conjunto de Bombas 2 até os Setores C e D, contribuindo com 25%. Nota-se novamente para esse setor que não houve grande discrepância entre os resultados percentuais das ações. Sendo que a Ação 3.4, última colocada, aparece com apenas 7 pontos percentuais a menos do que a segunda colocada, cenário bem diferente das outras hierarquizações apresentadas, exceto a hierarquização mostrada para o Setor D que ficou com um resultado bastante semelhante à essa. Isso deve ao fato de que para esses setores, apesar do alto custo de implantação dessa ação e de haver um aumento no consumo de energia, há também um aumento considerável na cobertura populacional provocada pela implantação da ação, fazendo, então, com que ela não tenha resultados tão distantes das outras ações avaliadas.

5.6.5 Sumarização dos resultados finais do AHP

Após as aplicações do AHP foi possível fazer um resumo dos resultados dessas aplicações em cada um dos setores do sistema e, com isso, obter algumas conclusões a respeito de quais ações são mais interessantes de serem aplicadas em cada um dos setores. A TABELA 75 apresenta a sumarização dos resultados finais do AHP por setor do sistema.

TABELA 75 – SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS FINAIS DO AHP POR SETOR DO SISTEMA

Setor de Aplicação	Hierarquização	Ação	Autovetor
A	1°	Ação 1.4 (B → A, C, D)	44%
	2°	Ação 1.1 (A → A)	41%
	3°	Ação 3.1 (ETA, RA, RB → A)	14%
B	1°	Ação 1.2 (A → B)	29%
	2°	Ação 1.3 (B → B)	22%
	3°	Ação 2.2 (C → B)	16%
	4°	Ação 2.4 (D → B)	16%
	5°	Ação 3.2 (ETA, RA, RB → B)	11%
	6°	Ação 3.3 (RB, C, D → C, D)	6%
C	1°	Ação 1.4 (B → A, C, D)	40%
	2°	Ação 2.1 (C → C)	32%
	3°	Ação 3.4 (RB, C, D → C, D)	28%
D	1°	Ação 1.4 (B → A, C, D)	43%
	2°	Ação 2.3 (D → D)	32%
	3°	Ação 3.4 (RB, C, D → C, D)	25%

Com o auxílio da TABELA 75 é possível perceber que em todos os setores do sistema há um predomínio pela execução da ação de detecção e correção de vazamentos (Ação 1), havendo apenas variação de qual setor será aplicada essa ação e com qual objetivo. Em relação ao setor de aplicação da ação de detecção e correção de vazamentos e qual o objetivo da ação, em três dos quatro setores do sistema, a prioridade é a execução dessa ação no Setor B com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no setores A, C e D (Ação 1.4), exceto no Setor B em que aparece que a ação de detecção e correção de vazamentos deve ser executada no Setor A com o objetivo de aumentar a cobertura populacional no Setor B (Ação 1.2). É importante ressaltar aqui uma característica comum a todos os setores, nem a sempre a ação que trará um melhor resultado ao setor em questão deve ser executada no próprio setor.

Nota-se também que na maior parte dos setores após a ação de detecção e correção de vazamentos, aparece como prioritária a ação de uso racional da água (Ação 2), com exceção do Setor A em que essa ação não possui influência e, portanto, não entra na análise. Assim, percebe-se que com a ação de uso racional da água nos Setores C e D, não necessariamente os usuários do próprio setor são beneficiados, mas principalmente os usuários do setor à montante são os principais beneficiados, no caso do Setor B.

Com relação à ação de substituição das adutoras antigas por novas adutoras (Ação 3), também aparece como um consenso em todas as hierarquizações de todos os setores como sendo a última ação na lista de ações prioritárias a ser executada. Isso se deve principalmente ao fato de que se trata de uma ação com alto custo de implantação e que proporciona um aumento no consumo de energia, por ter um acréscimo de vazão transportada, além de aumentar a vazão captada. Um dos únicos pontos positivos dessa ação é o aumento da cobertura populacional, mas isso não a torna suficiente para que a ação fique melhor classificada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o auxílio do estudo de caso foi possível apontar em cada um dos setores quais ações de eficiência hidroenergética são prioritárias a serem implantadas de acordo com a visão do grupo de *stakeholders* entrevistado.

De uma maneira geral, a ação prioritária a ser implantada no sistema em estudo é a de detecção e correção de vazamentos no Setores A e B. Essa ação, após a aplicação do AHP de acordo com a visão do grupo de *stakeholders*, aparece em primeiro lugar em todos os setores componentes do sistema. Isso se deve ao fato de que essa ação traz os melhores resultados para os critérios cobertura populacional e vazão captada em todos os setores. Sendo que na visão dos *stakeholders*, esses critérios são os mais importantes no momento da escolha de qual ação de eficiência hidroenergética executar. Além disso, é uma ação que não possui um custo de implantação tão alto quando comparado com o das outras e também não acarreta em alto consumo de energia.

Na sequência aparece a ação de uso racional da água nos Setores C e D naqueles setores em que essa ação possui influência direta. Essa ação é a que possui menor custo de implantação dentre todas, porém como para os *stakeholders* esse critério é apenas o terceiro mais importante, isso não faz com que a ação fique melhor classificada. Além disso, apesar de possuir bons resultados em relação à cobertura populacional e à vazão captada, esses resultados não são tão bons quando comparados aos apresentados pela ação de detecção e correção de vazamentos.

E, por fim, a última ação a ser executada em todos os setores é a substituição das adutoras antigas por novas adutoras. Em relação aos critérios avaliados, essa ação é a que possui maior custo de implantação e também maior consumo de energia, o que na visão dos *stakeholders* seria o menos preferível. Ainda, é uma ação que apesar de contribuir com o aumento da cobertura populacional nos setores, acarreta no aumento da vazão captada. Todos esses fatores fizeram, portanto, com que essa ação fosse a última opção no momento da escolha de qual ação de eficiência hidroenergética executar nos setores.

Com os resultados do estudo de caso, pode-se perceber a complexidade da situação, em que o objetivo era escolher dentre uma série de ações, quais trariam melhores resultados aos setores componentes do sistema em estudo. A escolha da ação, porém, não é uma tarefa simples. Para essa escolha podem ser avaliados os

mais diversos critérios, sendo nesse estudo de caso avaliados os critérios cobertura populacional, vazão captada, consumo de energia e custo de implantação. Além da seleção dos critérios a serem avaliados, é necessário também definir se há critérios mais importantes que outros ou se todos os critérios possuem pesos iguais. No estudo de caso em questão, para a definição da importância dos critérios foram feitas entrevistas com os *stakeholders* do sistema a fim de conhecer qual era a visão desse grupo em relação aos critérios selecionados. Com isso, concluiu-se que o critério mais importante no momento da escolha da ação de eficiência hidroenergética a ser aplicada era a vazão captada e logo na sequência a cobertura populacional. Já os critérios custo de implantação e consumo de energia foram considerados os menos importantes na visão do grupo de *stakeholders*. Com base em todos esses fatores, portanto, foi aplicado o AHP, um método de apoio à tomada de decisão, que hierarquiza as ações que trarão melhores resultados de acordo com o peso dado aos vários critérios selecionados. Após a aplicação do AHP, foi, então, possível verificar quais ações trariam melhores resultados em cada um dos setores.

Assim, com a elaboração dessa ferramenta e a inserção dela no CAMUS é possível, então, estabelecer uma relação entre a situação do sistema em estudo, a importância dos critérios selecionados e dos pesos desses critérios e das ações de eficiência hidroenergética selecionadas a fim de se obter uma hierarquização das melhores ações de eficiência hidroenergética a serem aplicadas no sistema em estudo. Com isso, pode-se avaliar uma ação não somente pensando no custo de implantação desta, que é a visão mais comum empregada atualmente, mas pensando em um balanço entre a questão social, ambiental e financeira que pode variar de acordo com o interesse do grupo de *stakeholders* envolvido na decisão.

Essa ferramenta traz também essa possibilidade, de ser levada em consideração, no momento da escolha da ação de eficiência hidroenergética a ser executada, a opinião de vários *stakeholders* que podem estar envolvidos no processo decisório, como a prestadora de serviços de saneamento, os órgãos ambientais, as empresas privadas, a comunidade como um todo, entre outros. Sendo possível, com o uso do AHP, harmonizar todas essas opiniões e chegar-se a um consenso do grupo como um todo.

Assim, a elaboração dessa ferramenta e a inserção dela no CAMUS, vem auxiliar na tomada de decisão sobre a escolha das ações de eficiência hidroenergética que trarão melhores resultados para o SAA, avaliando essas ações por critérios

financeiros, sociais e ambientais e, ainda, tendo em vista os diferentes interesses dos usuários do sistema. Sendo possível ao fim da execução da ferramenta, elaborar um conjunto de diretrizes para o uso eficiente da água e energia no SAA analisado.

REFERÊNCIAS

- ABES. Consumo de água. In.: GONÇALVES, Ricardo Franci (Org.). Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Cap. 2, p. 36-98. 2009.
- ACZEL, J.; SAATY, T. L. Procedures for Synthesizing Ratio Judgements. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 27, p. 93-102, 1983.
- ALKASSEH, J. M. A. et al. Applying Minimum Night Flow to Estimate Water Loss Using Statistical Modeling: A Case Study in Kinta Valley, Malaysia. **Water Resources Management**, v. 27, n. 5, p. 1439–1455, 2013.
- ALVES, L. G. K.; NYKIEL, T. P. . B. M. C. N. Comparação analítico entre métodos de apoio à decisão (AMD). **Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, p. 4–7, 2007.
- ANA, Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos: informe 2015**. Brasília: Agência Nacional das Águas, 2015.
- ANA, Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno**. Brasília: Agência Nacional das Águas, 2017.
- ARBUÉS, F.; VILLANÚA, I. Potential for pricing policies in water resource management: Estimation of urban residential water demand in Zaragoza, Spain. **Urban Studies**, v. 43, n. 13, p. 2421–2442, 2006.
- BAUMANN, D. D.; BOLAND, J. J.; HANEMANN, W. M. **Urban Water Demand Management and Planning**. New York: McGraw-Hill, 1998.
- BOUKHARI, S. et al. Application of the analytic hierarchy process to sustainability of water supply and sanitation services: The case of Algeria. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 18, n. 4, p. 1282–1293, 2018.
- BRANDES, B. O. M.; MAAS, T.; REYNOLDS, E. **Thinking Beyond Pipes and Pumps: top 10 communities can save water and money**. Victoria: University of Victoria, 2006.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2016**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p.
- BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2014**. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento - SNSA, p. 212, 2016.
- BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 3. ed. rev ed. Brasília: Fundação Nacional da Saúde, 2006.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Política e plano municipal de saneamento ambiental: experiências e recomendações**. Brasília: Organização Panamericana da Saúde; Ministério das Cidades, Programa de Modernização do Setor de Saneamento, 2005.

BRASILIAN ENERGY RESEARCH COMPANY. National Energy Balance 2017: Base year 2016, Summary Report [in Portuguese]. **Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE, 2017**, p. 1–61, 2017.

BROOKS, D. B. An operational definition of water demand management. **International Journal of Water Resources Development**, v. 22, n. 4, p. 521–528, 2006.

BRUNELLI, M. **Introduction to the Analytic Hierarchy Process**. Aalto: Dept. of Mathematics & Systems Analysis; Aalto University, 2015.

BUTLER, D.; MEMON, F. A. Water Demand Management David Butler and Fayyaz Ali Memon Department of Civil & Environmental Engineering. n. May 2014, p. 2014–2017, 2006.

COSTA, H. **Introdução Ao Método De Análise Hierárquica**. Niterói: H. G. Costa, 2002.

CRUZ, N. F. DA; MARQUES, R. C. Nuno Ferreira da Cruz and Rui Cunha Marques A multi-criteria model to determine the sustainability level of water services. 2014.

DAI, J. et al. Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment. **Applied Energy**, v. 210, n. September 2017, p. 393–408, 2018.

DE LA TORRE, A. Efficiency optimization in SWRO plant: high efficiency & low maintenance pumps. **Desalination**, v. 221, n. 1–3, p. 151–157, 2008.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras. **Eficiência Energética em Sistema de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras. **Relatório Anual da Eletrobrás 2005**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2006.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017: ano base 2016**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2015.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE. **Variable Speed Drives: A way to lower life cycle costs**. USA: Hydraulic Institute; Europump, 2004.

FELDMAN, M. Aspects of energy efficiency in water supply systems. **Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference**, n. April, p. 85–89, 2009.

FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 3, p. 237–244, 2012.

GLEICK, P. H. A look at twenty-first century water resources development. **Water International**, v. 25, n. 1, p. 127–138, 2000.

GOMES, H. P. **Eficiência hidráulica e energética em saneamento: análise econômica de projetos**. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

GONÇALVES, O. M.; DE AMORIM, S. V. Roteiros para códigos de prática. **Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Águas**, 1999.

GUO, X. L. et al. Analysis of first transient pressure oscillation for leak detection in a single pipeline. **Journal of Hydrodynamics**, v. 24, n. 3, p. 363–370, 2012.

HAMCHAOUI, S.; BOUDOUKHA, A.; BENZERRA, A. Drinking water supply service management and sustainable development challenges: Case study of Bejaia, Algeria. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 64, n. 8, p. 937–946, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. Paris: International Energy Agency, 2012.

KARATHANASI, I.; PAPAGEORGAKOPOULOS, C. Development of a Leakage Control System at the Water Supply Network of the City of Patras. **Procedia Engineering**, v. 162, p. 553–558, 2016.

KAYA, D. et al. Energy efficiency in pumps. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 6, p. 1662–1673, 2008.

KILINÇ, Y. et al. Evaluation of technical performance of pipes in water distribution systems by analytic hierarchy process. **Sustainable Cities and Society**, v. 42, n. March, p. 13–21, 2018.

LAMBERT. International Report: Water losses management and techniques. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 2, n. 4, p. 1–20, 2002.

LARSEN, M. A. D.; DREWS, M. Water use in electricity generation for water-energy nexus analyses: The European case. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2044–2058, 2019.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; ERTUGRUL, N. Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems. **Drinking Water Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 15–21, 2012.

RAJANI, B.; MAKAR, J. A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 6, p. 1259–1272, 2000.

RINGLER, C.; BHADURI, A.; LAWFORD, R. The nexus across water, energy, land and food (WELF): Potential for improved resource use efficiency? **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 5, n. 6, p. 617–624, 2013.

RODRIGUES, W. “ Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água ”. p. 1–19, 2007.

SAATY, T. L. **The Analythic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. Group Decision Making and the AHP. **The Analytic Hierarchy Process**, p. 59–67, 1989.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. New York: Springer Science+Business Media New York, 2001.

SANEPAR. Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana. 2013.

SANEPAR. **Sistema Iraí - Vila Amélia**, 2014.

SANTOS, D. C. dos. **Saneamento para a gestão integrada das águas urbanas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 1 ed.

SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Urban water demand management: Prospects and challenges for the developing countries. **Water and Environment Journal**, v. 23, n. 3, p. 210–218, 2009.

SIMPSON, A. R.; MARCHI, A. Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 12, p. 1314–1317, 2013.

STAVENHAGEN, M.; BUURMAN, J.; TORTAJADA, C. Saving water in cities: Assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. **Cities**, v. 79, n. March, p. 187–195, 2018.

SUTADIAN, A. D. et al. Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. **Ecological Indicators**, v. 75, p. 220–233, 2017.

TROW, S.; FARLEY, M. Developing a strategy for leakage management in water distribution systems. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 4, n. 3, p. 149–168, 2004.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento De Água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

ULANICKI, B. et al. Open and closed loop pressure control for leakage reduction. **Urban Water**, v. 2, n. 2, p. 105–114, 2000.

VAN THIENEN, P. A method for quantitative discrimination in flow pattern evolution of water distribution supply areas with interpretation in terms of demand and leakage. **Journal of Hydroinformatics**, v. 15, n. 1, p. 86, 2013.

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 701–714, 2014.

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Exploring the water-energy nexus in Brazil: The electricity use for water supply. **Energy**, v. 85, p. 415–432, 2015.

WOOD, D. J.; REDDY, L. S. Control de Bombas de Velocidad Variable y Modelos em Tiempo Real para Minimizar Fugas y Costes Energéticos. In: CABRERA, E.; VELA, A. F. Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad em Sistemas de Distribución de Agua. Valência, Espanha: Universidad Politécnica de Valência, Universitat Jaume I de Castellón, 1994, p. 173-207.

WU, Z. Y. Unified parameter optimisation approach for leakage detection and extended-period simulation model calibration. **Urban Water Journal**, v. 6, n. 1, p. 53–67, 2009.

WWAP, U. N. W. W. A. P. The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. **UNESCO**, v. 1, p. 397–399, 2014.

WWAP, U. N. W. W. A. P. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions for Water. 2018.

XU, Q. et al. Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 26, n. 5, p. 955–961, 2014.

ZYOUNG, S. H. et al. Utilizing analytic hierarchy process (AHP) for decision making in water loss management of intermittent water supply systems. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v. 6, n. 4, p. 534–546, 2016.

APÊNDICE 1 – QUESTIONÁRIO UTILIZADO PARA ENTREVISTAR OS STAKEHOLDERS

Dados pessoais

Ocupação:

Empresa:

Objetivo: Executar ações que promovam a melhoria do sistema de abastecimento de água afim de diminuir o consumo de energia e as perdas de água do sistema.

Escala de julgamentos

Intensidade de Importância	Definição	Significado
1	Importância igual	Os dois critérios têm a mesma importância.
3	Importância levemente forte	O critério é levemente superior ao outro.
5	Importância forte	O critério é fortemente superior ao outro.
7	Importância muito forte	O critério é muito fortemente superior ao outro.
9	Importância absoluta	O critério é absolutamente superior ao outro.

Explicação dos critérios

Critérios	Explicação
Cobertura populacional	Representa o número de pessoas que são abastecidas por água pelo sistema de abastecimento de água.
Vazão captada	Representa a vazão que será captada em um determinado rio, isto é, a quantidade de água que será retirada de um rio para abastecer a todos. Com isso, dependendo da quantidade de água retirada, as condições ambientais de um rio podem ser afetadas de maneira adversa.
Consumo de energia	Representa o consumo de energia do sistema de abastecimento de água.
Custo de implantação	Representa o custo que a prestadora de serviços de abastecimento de água terá para implantar uma ação em um sistema de abastecimento de água.

Supondo que uma ação será executada em um sistema de abastecimento de água. Com base na escala de julgamentos e na explicação dos critérios acima, selecione o grau de importância entre as comparações dos critérios abaixo, de acordo com o ponto de vista que você acha que a empresa onde você trabalha teria.

